

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR DE ENTRENAMIENTO EN
RECTIFICADORES PARCIAL Y TOTALMENTE CONTROLADOS**

LALO ÓMAR GARCÉS MORCILLO

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2007**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR DE ENTRENAMIENTO EN
RECTIFICADORES PARCIAL Y TOTALMENTE CONTROLADOS**

LALO ÓMAR GARCÉS MORCILLO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

**Director
JOHNNY POSADA CONTRERAS
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2007**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Ing. JOHNNY POSADA CONTRERAS
Director

Ing. FARUK FHONTAL
Jurado

Santiago de Cali, 02 de Noviembre de 2007

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	13
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
1. EL RECTIFICADOR CONTROLADO: FUNCIONAMIENTO	19
1.1. RECTIFICADOR SEMICONTROLADO MONOFÁSICO	19
1.2. RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO	23
1.3. RECTIFICADOR CONTROLADO TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA (RECTIFICADOR DE 3 PULSOS)	27
1.4. RECTIFICADOR CONTROLADO TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA (RECTIFICADOR DE 6 PULSOS)	31
2. MICROCONTROLADOR PIC 18F458	37
3. IMPLEMENTACIÓN	42
3.1. ETAPA DE SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CONTROL	42
3.2. ETAPA HARDWARE	46
3.2.1. Detector de cruces entre fases	46
3.2.2. Detector de cruces por cero	53
3.2.3. Circuito de control	55
3.2.4. Circuito Driver	60
3.2.5. Plataforma de conexión para el Rectificador Controlado	64
3.3. ETAPA SOFTWARE	67
3.3.1. Diseño Arquitectural	67
3.3.2. Diagramas de flujo	92

4. RESULTADOS OBTENIDOS	102
5. CONCLUSIONES	112
6. RECOMENDACIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	116

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Comportamiento del circuito rectificador de 6 pulsos.	33
Tabla 2.1 Características del microcontrolador PIC18F458.	41
Tabla 3.1. Análisis realizado para determinar la alternativa de solución a implementar.	45
Tabla 3.2. Señales utilizadas en la comunicación RS232 y su distribución de pines en los conectores DB9 y DB25.	55
Tabla 3.3. Instrucciones de configuración inicial utilizadas para trabajar el LCD en el modo ya descrito utilizado para esta implementación.	80
Tabla 3.4. Fases que se cruzan de acuerdo al estado de las señales que se leen.	89
Tabla 3.5. Secuencia de disparos de acuerdo a los cruces detectados.	90
Tabla 3.6. Secuencia de disparos de acuerdo a los cruces detectados.	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Topología del rectificador puente semi-controlado monofásico.	20
Figura 1.2. Cruces por cero de la señal de voltaje original.	21
Figura 1.3. Diagrama de bloques del circuito genera los pulsos de disparo de los tiristores.	21
Figura 1.4. Señales a partir de las cuales se generan los pulsos de disparo.	22
Figura 1.5. Formas de onda de voltaje del Rectificador monofásico semi-controlado.	22
Figura 1.6. Corriente en la carga y que circula a través de los tiristores y diodos del puente.	23
Figura 1.7. Topología del rectificador totalmente controlado tipo puente.	24
Figura 1.8. Formas de onda del Rectificador Totalmente Controlado Monofásico.	25
Figura 1.9. Corriente que circula en la carga y a través de los tiristores del puente para un ángulo de disparo de 60° .	26
Figura 1.10. Corriente en la carga para un ángulo de disparo de 100° .	26
Figura 1.11. Topología del rectificador trifásico de media onda o rectificador de 3 pulsos.	27
Figura 1.12. Formas de onda en un rectificador de 3 pulsos para una carga inductiva.	29
Figura 1.13. Corriente en una carga inductiva frente a la tensión de salida.	29
Figura 1.14. Tren de pulsos angostos que identifican los cruces entre dos fases cualesquiera, en el semiciclo positivo. Se tienen 3 pulsos por cada periodo completo debido que durante éste se presentan 3 cruces entre fases.	30

Figura 1.15. Formas de onda que muestran cómo se generan las portadoras que al compararse con la tensión de control, generan los pulsos de disparo de los SCR's.	30
Figura 1.16. Topología del rectificador trifásico de onda completa o de 6 pulsos.	31
Figura 1.17. Ondas cuadradas que representan los cruces entre las fases.	33
Figura 1.18. Forma de onda al disparar el circuito con un ángulo de 0° (cuadro medio) y con un ángulo de 35° (cuadro superior).	34
Figura 1.19. Corriente en la carga frente al voltaje de salida, para un ángulo de 35° .	34
Figura 1.20. Pulsos que indican los cruces entre fases tanto en el semiciclo positivo como en el negativo. Son 6 pulsos por cada periodo completo debido a que se presentan 6 cruces.	35
Figura 1.21. Portadoras que se deben generar a partir de los cruces entre 2 fases para el rectificador de 6 pulsos. A diferencia del rectificador de 3 pulsos, se generan portadoras para los cruces en el semiciclo negativo también.	36
Figura 2.1. Diagrama de bloques interno del microcontrolador PIC18F458.	40
Figura. 3.1. Señales que se obtienen después de la comparación entre las fases.	47
Figura. 3.2. Circuito que convierte una onda cuadrada en pulsos de subida.	47
Figura. 3.3. Señales de salida del circuito detector de cruces. La señal de la parte superior es la salida del acondicionamiento.	48
Figura. 3.4. Esquemático del circuito detector de cruces entre fases completo.	49
Figura. 3.5. Diseño final de la tarjeta detector de cruces entre fases (pistas).	50
Figura. 3.6. Ubicación de componentes en la tarjeta diseñada para el detector de cruces entre fases.	50

Figura. 3.7. Señal de salida del circuito que representa los cruces por cero de la “fase a”.	51
Figura. 3.8.. Esquemático completo del detector de cruces por cero.	52
Figura. 3.9.. Diseño final del circuito detector de cruces por cero (pistas).	52
Figura. 3.10. Ubicación de componentes en la tarjeta detector de cruces por cero.	53
Figura. 3.11. Conector DB9 adaptado para una comunicación RS232 sin señales de “handshaking” por hardware.	55
Figura. 3.12. Esquemático del circuito de control.	56
Figura. 3.13. Diseño final del circuito de control (pistas).	57
Figura. 3.14. Componentes del circuito de control.	57
Figura. 3.15. Esquemático del circuito que contiene los driver’s.	60
Figura. 3.16. Diseño final de las tarjetas de los driver’s (pistas).	61
Figura. 3.17. Componentes de las tarjetas de los driver’s.	61
Figura. 3.18. Bosquejo del panel acrílico que es la plataforma de conexión para el Rectificador Controlado.	63
Figura. 3.19. Vista General del panel.	64
Figura 3.20. Vista general del panel desde otro ángulo.	64
Figura 3.21. Plano General del Panel de conexión.	65
Figura 3.22. Detalles de algunas zonas del Panel de Conexión.	65
Figura 3.23. Plano detallado de algunas zonas del panel de conexión que no se visualizan en el plano general.	66
Figura 3.24. Plano de las barras metálicas de la parte trasera del panel.	66
Figura 3.25. Bosquejo del panel de alimentación.	67
Figura 3.26. Primer Nivel del diseño arquitectural o Modelo de Caja Negra.	68

Figura. 3.27. Segundo Nivel del diseño arquitectural. Pueden verse los bloques funcionales internos del sistema de manera general.	69
Figura 3.28. Nivel 3 del diseño arquitectural en el subsistema de Configuración donde se observan los bloques dentro de este subsistema.	70
Figura 3.29. Tercer nivel del diseño arquitectural para el bloque de comunicación.	72
Figura 3.30. Tercer nivel del diseño arquitectural aplicado al bloque de Control.	75
Figura 3.31. Cuarto nivel del diseño arquitectural aplicado al subsistema Lectura, el cual, pertenece al bloque de configuración.	77
Figura 3.32. Cuarto nivel del diseño arquitectural aplicado al subsistema de Visualización.	79
Figura 3.33. Cuarto nivel del diseño arquitectural aplicado al subsistema de Distribución de Datos.	81
Figura 3.34. Cuarto nivel del diseño arquitectura aplicado al subsistema Rectificadores, el cual corresponde al bloque de Control.	83
Figura 3.35. Quinto Nivel del Diseño Arquitectural aplicado al subsistema SemiControlado Monofásico, del bloque Rectificadores.	87
Figura 3.36. Quinto Nivel del diseño arquitectural aplicado al bloque TotalControlado Monofásico.	87
Figura 3.37. Diseño arquitectural aplicado al subsistema Tres Pulsos Trifásico.	88
Figura 3.38. Diseño arquitectural en el quinto nivel aplicado al Subsistema Seis Pulsos Trifásico, perteneciente al bloque Rectificadores.	91
Figura 3.39. Diagrama de flujo de la función de lectura.	93
Fig. 3.40. Diagrama de flujo que implementa la función de distribución de datos.	94
Fig. 3.41. Diagrama de flujo para implementar la función de control de la visualización.	95

Fig. 3.42. Primera parte del Diagrama de flujo de la función de comunicación a un nivel no tan bajo.	96
Figura 3.43. Segunda parte del diagrama de flujo de la función de comunicación.	97
Figura 3.44. Diagramas de flujo de las funciones de Recepción y Transmisión.	97
Figura 3.45. Diagrama de flujo para el control de las topologías Monofásicas, Semicontrolado y Totalmente Controlado.	98
Figura 3.46. Diagrama de flujo para el control del Rectificador de 3 Pulsos.	99
Figura 3.47. Diagrama de flujo de la primera parte de la función encargada de controlar el Rectificador de 6 Pulsos.	100
Fig. 3.48. Diagrama de flujo de la función que genera los disparos de los SCR's para el Rectificador de 6 Pulsos.	101
Figura 4.1. Circuito Rectificador Controlado Monofásico.	102
Figura 4.2. Circuito Rectificador Monofásico Totalmente controlado.	103
Figura 4.3. Rectificador Controlado Trifásico de media onda o Rectificador de 3 pulsos.	103
Figura 4.4. Circuito Rectificador Controlado de onda completa o Rectificador de 6 pulsos	104
Figura 4.5. Primer menú que aparece cuando se inicia el sistema.	105
Figura 4.6. Menú 2, el cual, permite seleccionar la topología que se desea poner a funcionar.	105
Figura 4.7. Instante en el cual se debe confirmar o des-hacer la opción escogida.	106
Figura 4.8. Instante donde debe introducirse el ángulo de disparo.	107
Figura 4.9. Formas de onda de los pulsos que recibe el microcontrolador y de los disparos que éste genera.	107
Figura 4.10. Formas de onda después de incrementar en línea el ángulo de disparo.	108

Figura 4.11. Formas de onda resultantes después de disminuir el ángulo de disparo en línea.	108
Figura 4.12. Sistema después de haber sido detenido.	109
Figura 4.13. Módulo de alimentación.	109
Figura 4.14. Circuito de control.	110
Figura 4.15. Circuito detector de cruces entre fases.	110
Figura 4.16. Circuito detector de cruces por cero.	110
Figura 4.17. Transformadores que acondicionan las señales de AC.	111
Figura 4.18. Circuito driver para el disparo de los SCR's.	111
Figura 4.19. Circuitos que componen el hardware del sistema.	111

GLOSARIO

AC: corriente alterna; forma de corriente o voltaje que cambia de polaridad constantemente.

CONMUTACIÓN: cambio del estado de un dispositivo semiconductor en un circuito; por lo general, se asocia con el paso de encendido a apagado, pero también puede utilizarse para describir el cambio de apagado a encendido.

DC: corriente directa: forma de corriente o voltaje que tiene una sola polaridad.

MICROCONTROLADOR: sistema que contiene los tres elementos básicos de un computador: cpu, memoria e interfaces de entrada y salida encapsulados dentro del mismo circuito integrado.

MICROPROCESADOR: unidad central de todo sistema de cómputo conocida como cpu, la cual es la encargada de realizar operaciones lógicas – aritméticas y de ejecutar instrucciones; requiere de unidades adicionales como memoria y unidades de entrada y salida para que pueda funcionar.

MONOFÁSICO: sistema de alimentación que recibe la señal de una sola de las fases de la red eléctrica.

RECTIFICADOR: circuito electrónico implementado mediante diodos, tiristores o transistores que convierte tensión y corriente AC en DC.

SCR: tiristor de control de fase que se comporta como un diodo cuando se encuentra en polarización directa y es activado por un pulso de corriente en la terminal gate (compuerta); no se le puede controlar el apagado.

SEMICONDUCTOR: dispositivo electrónico construido a partir de una combinación de materiales que producen una aleación cuya conductividad eléctrica no es tan alta como un conductor ni tan baja como un aislante. Por lo general se utiliza silicio o germanio contaminado con algunas impurezas.

TRIFÁSICO: sistema de alimentación que recibe las señales de las tres fases de la red eléctrica.

TIRISTOR: dispositivo semiconductor de potencia de 4 capas y tres uniones PNPN que permite la conducción de corriente en un solo sentido o en ambos sentidos y que debe ser activado para que entre a conducir.

RESUMEN

En este trabajo se realizó el diseño y la implementación de una plataforma que permite el funcionamiento de un Rectificador Controlado en alguna de sus formas y así realizar prácticas de laboratorio en la temática Rectificadores Controlados, perteneciente al área de Electrónica de Potencia. Dicha plataforma permite hacer la conexión física de la topología deseada y seleccionar el algoritmo de control que permita el funcionamiento adecuado de la misma. De esta manera se permite abordar de forma práctica una temática que hasta el momento solo puede mirarse teóricamente, debido a la complejidad de los circuitos Rectificadores Controlados y por ende, a la dificultad existente para realizar el montaje y el control de cualquiera de ellos.

En este documento se presenta una descripción detallada del trabajo realizado, empezando por el análisis del principio de funcionamiento del Rectificador Controlado en sus diferentes topologías, con el objetivo de entender cómo funciona cada uno de los circuitos y conocer las funciones que debe ejecutar el sistema de control de los mismos. Después se describe la tecnología seleccionada para implementar los diferentes algoritmos que debe ejecutar el sistema de control y por último, se realiza la descripción de cada uno de los elementos que intervienen en la solución final desarrollada, teniendo en cuenta la manera cómo se seleccionó la tecnología sobre la cual se implementa dicha solución.

Finalmente, se exponen los resultados obtenidos durante todo el proceso de diseño y se realizan unas recomendaciones especiales para que el posterior funcionamiento del sistema sea correcto y no se presenten daños por malos manejos que se le den; por ejemplo, se recomienda la forma en la cual se debe realizar la conexión de los elementos de la plataforma sobre la cual se realizan los montajes, sobre la selección del algoritmo de control, sobre las conexiones internas que deben hacerse, entre otros.

INTRODUCCIÓN

La electrónica de potencia es el área que se encarga de estudiar los sistemas de conversión de energía eléctrica de una forma a otra mediante la utilización de dispositivos semiconductores, los cuales, se encargan de controlar el sentido del flujo de energía y la conversión de la misma. Los tipos de conversión de energía que existen son los siguientes:

- Conversión AC/DC. Realizada por circuitos rectificadores, los cuales pueden ser controlados o no controlados.
- Conversión DC/DC. Realizada por circuitos reguladores de tensión, los cuales pueden ser tipo serie o conmutados; estos últimos se implementan mediante interruptores de potencia.
- Conversión DC/AC. Realizada por circuitos inversores que utilizan interruptores de potencia controlados mediante alguna técnica de modulación.
- Conversión AC/AC. Realizada por circuitos cicloconvertidores, los cuales básicamente varían la frecuencia y la amplitud de la señal AC de salida.

La conversión AC/DC es la más importante y la más utilizada de todas porque se utiliza para alimentar las cargas que demandan tensión y corriente DC para su funcionamiento, las cuales son todos los dispositivos electrónicos y otros dispositivos no electrónicos que igual la necesitan, tales como motores de DC, hornos, sistemas de iluminación, entre otros. Por lo tanto, los circuitos rectificadores son ampliamente utilizados en la industria y por ende, corresponden a un extenso campo de investigación, porque contienen elementos que van más allá de la simple obtención de una tensión DC a partir de una señal de AC.

Como ya se mencionó, la conversión AC/DC puede ser básicamente de dos maneras: No controlada y Controlada. En la primera, se obtiene una señal de DC de magnitud constante, la cual, dependiendo de la técnica utilizada y del filtrado que se le realice, presenta unas características de rizado, eficiencia, distorsión armónica y factor de potencia particulares. Su implementación se realiza mediante diodos rectificadores, los cuales son dispositivos que tienen la capacidad de permitir el flujo de potencia en una sola dirección.

Y en la segunda, se obtiene una tensión DC de magnitud variable, la cual se utiliza para cargas donde sea necesario variar el flujo de potencia que se le inyecta para obtener algún comportamiento en especial o para controlar algún parámetro de su funcionamiento, tales como lámparas, hornos, motores de DC, entre otros. Dependiendo de la técnica utilizada y de las condiciones de

filtrado, se obtienen también características particulares de rizado, eficiencia, factor de potencia y distorsión armónica. Su implementación física se realiza a través de interruptores de potencia, tales como tiristores y transistores, a los cuales se les puede controlar el encendido y en algunos casos, el apagado.

Las técnicas que pueden utilizarse para realizar conversión AC/DC o rectificación son: Rectificación monofásica, la cual consiste en tomar la señal AC de una sola de las fases de la red de alimentación, pasarla por un circuito que puede ser de diodos o tiristores (o en su defecto, transistores) si la rectificación es controlada o no, y que puede tener una topología particular. Y la otra técnica se conoce como Rectificación trifásica, que consiste en tomar la señal AC de cada una de las fases de la red de alimentación y pasarlas por un circuito que las rectifica y las convierte en una sola señal de DC.

Adicionalmente, la rectificación puede ser de media onda o de onda completa, dependiendo de la cantidad de dispositivos semiconductores utilizados y de la forma de conexión de los mismos. La rectificación de media onda únicamente utiliza el semiciclo positivo de la señal de AC, mientras que la de onda completa rectifica ambos semiciclos, razón por la cual es mucho más eficiente.

En este trabajo se desarrolla un sistema de rectificación controlada implementado con SCR's, que puede utilizarse con cualquiera de las técnicas mencionadas para realizar la conversión AC/DC. Los SCR's son dispositivos a los cuales se les puede controlar el encendido (o la entrada a conducción) mediante la inyección de un pulso de corriente en la terminal gate, pero no el apagado. Esta técnica se conoce como control de fase y no incluye ninguna técnica de modulación porque no se requiere obtener una señal de salida con alguna forma en especial.

El objetivo principal de este trabajo es diseñar y construir un módulo de entrenamiento o plataforma que permita la realización de prácticas de laboratorio en Rectificadores Controlados monofásicos y trifásicos, implementado mediante SCR's. Adicionalmente, se deben caracterizar las topologías de conversión AC/DC controlada que utilicen SCR's como interruptores de potencia; implementar la parte física dentro de un módulo portable para que pueda montarse y desmontarse de cualquier banco de proyectos, implementar el sistema con una arquitectura modular para que pueda utilizarse con varias topologías y por ende, diferentes algoritmos de control. Y por último, el sistema debe permitir la comunicación con otros dispositivos para ejercer una interacción indirecta.

Los alcances del mismo están orientados hacia la existencia en la Universidad de un sistema de entrenamiento para realizar prácticas académicas con mucha mayor facilidad para los cursos de electrónica de potencia y afines, en la temática de Rectificadores Controlados, permitiendo así un mejor desarrollo de dichos cursos y la interacción de los estudiantes con circuitos montados y funcionando tal y como se ve en las clases. Este aspecto se traduce en un mejoramiento de los cursos y en un aumento en el nivel de aprendizaje de los

estudiantes debido a que va a brindar la experiencia de trabajo práctico con este tipo de circuitos. Y además, se brinda la posibilidad de soporte a proyectos futuros donde se requiera de un sistema de alimentación variable para su desarrollo y posterior funcionamiento.

Las limitaciones están dirigidas hacia la utilización del sistema para aplicaciones prácticas de alta potencia, tales como la alimentación de sistemas de iluminación, hornos u otras aplicaciones de regulación de altas temperaturas, control de velocidad y de par para motores de DC, entre otras, las cuales requieren de tensiones y corrientes altas. Esto se debe a que el sistema fue diseñado para su aplicación en el campo académico y por ende, sus condiciones de operación se limitan a cargas que manejan potencias bajas.

Adicionalmente, este trabajo es importante dentro del campo de la electrónica de potencia a nivel académico porque es la primera vez en la Universidad Autónoma que se diseña una aplicación de este tipo de manera modular, es decir, que aunque abarque una sola temática, como lo es la de Rectificadores Controlados, permita el funcionamiento del sistema en las diferentes variaciones que dicha temática presenta, lo cual lo hace mucho más útil que otros sistemas que se han diseñado, porque permite a los estudiantes más capacidad de interacción con el mismo. Y aunque anteriormente se han realizado sistemas de doble conversión AC/DC/AC, rectificadores controlados trifásicos de seis pulsos con SCR's, rectificadores controlados de tres pulsos, inversores PWM y otro tipo de proyectos en diferentes temáticas de la electrónica de potencia, la concepción de cada uno de ellos fue para funcionar de una sola manera.

Finalmente, el camino que se empleó para llegar a la solución final implementada fue: Primero se realizó la caracterización de cada una de las topologías que se querían implementar en el proyecto, analizando detalladamente el principio de funcionamiento de cada una de ellas. Las topologías implementadas fueron: Rectificador Monofásico Semi-Controlado, Rectificador Monofásico Totalmente Controlado, Rectificador Trifásico Controlado de Media Onda (más conocido como Rectificador de Tres Pulsos) y Rectificador Trifásico Controlado de Onda Completa (o Rectificador de Seis Pulsos).

El siguiente paso fue realizar las simulaciones del comportamiento de cada uno de los circuitos estudiados para compararlos uno por uno con el comportamiento ideal que deben tener, de acuerdo a la investigación realizada. Luego se diseñaron las estrategias de control para cada topología y el algoritmo de control que las integra en un solo sistema y que además, maneja las comunicaciones con los dispositivos de configuración externos. Después se diseñaron las tarjetas correspondientes al hardware del sistema y finalmente, se realizó el montaje de las mismas para poder realizar las pruebas pertinentes antes de llegar a la solución final. Adicionalmente, se diseñó un módulo de alimentación cuyo fin es utilizarlo con cualquier banco de proyectos

y otro módulo para realizar la plataforma física donde se realizan las conexiones de cada una de las topologías.

1. EL RECTIFICADOR CONTROLADO FUNCIONAMIENTO

Un Rectificador Controlado es un circuito que genera una tensión de DC variable a partir de una entrada de AC con frecuencia constante y magnitud rms fija, el cual, puede implementarse de diferentes maneras dependiendo de la aplicación específica para la cual sea requerido. Algunas de esas aplicaciones requieren, por ejemplo, demasiada demanda de corriente o de potencia, una variación grande o pequeña de la tensión de salida, estabilidad del sistema en general o simplemente tienen especificaciones de corriente y potencia media o baja.

Las Topologías más comunes de Rectificadores Controlados son:

- Rectificador Monofásico Semicontrolado.
- Rectificador Monofásico Totalmente Controlado.
- Rectificador Trifásico de 3 pulsos.
- Rectificador Trifásico de 6 pulsos.

Para las aplicaciones de mediana o baja potencia se utilizan los Rectificadores Monofásicos Total o Parcialmente Controlados, los cuales son sencillos de implementar porque se controla el disparo de un SCR (o dos, pero al mismo tiempo como en Totalmente Controlado) por cada semiciclo de la onda de voltaje de entrada. En aplicaciones donde la carga es inductiva o se requiera de alguna manera regeneración de potencia hacia la línea de AC, se utiliza el Rectificador Totalmente Controlado debido a que permite la conducción de los SCR's en parte del siguiente semiciclo y por ende, ángulos de disparo superiores a 90° .

Pero para las aplicaciones donde se requiere mayor potencia y corriente de salida se utilizan los Rectificadores Trifásicos, debido a que permiten distribuir dicha potencia demandada por la carga entre las tres fases del sistema evitando así que éste quede desbalanceado, y por ende, permiten una mayor estabilidad del mismo. Adicionalmente, los Rectificadores de 6 pulsos se prefieren sobre los de 3 pulsos en aplicaciones donde se requiera de una mejor eficiencia.

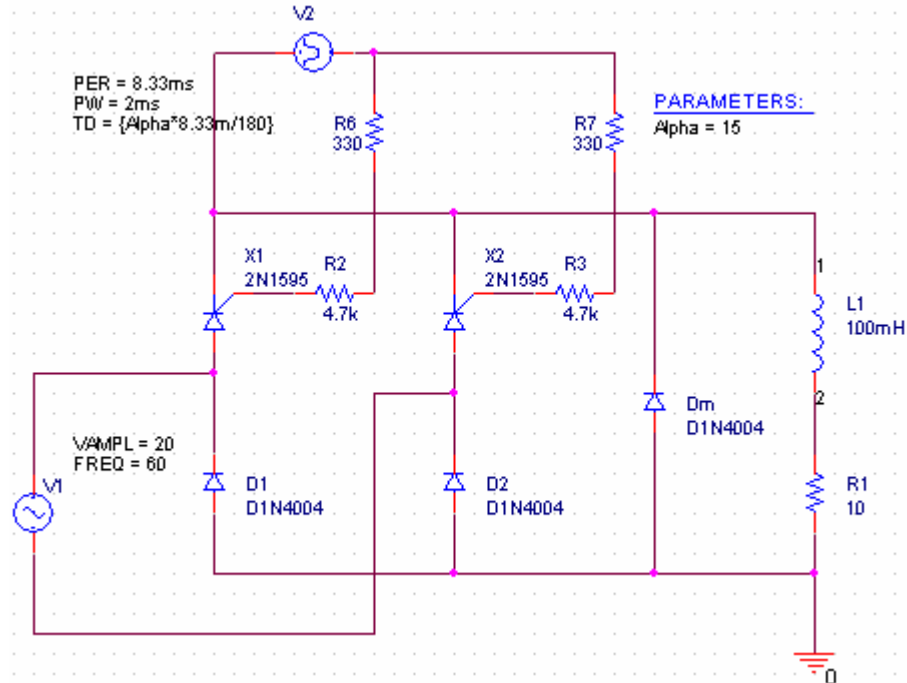
A continuación se dará una explicación más profunda de cada una de las topologías mencionadas:

1.1. RECTIFICADOR SEMI-CONTROLADO MONOFÁSICO

Esta topología consiste de un puente rectificador conformado por dos SCR's en la parte superior y dos diodos de potencia en la parte inferior. Adicionalmente, se utiliza un tercer diodo conectado en paralelo con el puente cuando la carga

del circuito es inductiva, el cual se conoce como diodo de rueda libre y tiene como función generar un camino adicional a la corriente cuando se producen retrasos en el ángulo de disparo de los tiristores.

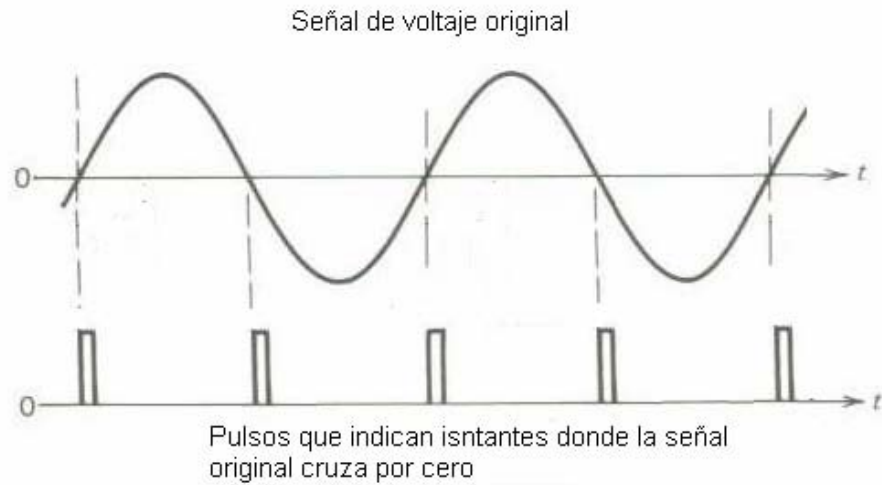
Figura 1.1. Topología del rectificador puente semi-controlado monofásico.



El principio de funcionamiento es el siguiente: Primero se dispara a un ángulo determinado el tiristor T_1 para rectificar el semiciclo positivo mediante el camino que se genera entre éste, la carga y el diodo D_4 , y luego se dispara el tiristor T_2 , con el mismo ángulo de retraso, para rectificar el semiciclo negativo a través del diodo D_3 . Como el objetivo es realizar un disparo de los tiristores sincronizado con la señal a rectificar, se debe detectar el instante exacto donde la onda de voltaje cruza por cero para determinar así a partir de que punto se genera el ángulo de retraso en el encendido de los mismos.

Lo anterior, se realiza comparando la señal de AC de la línea con un nivel cero y acondicionando la señal que se obtiene, la cual es una onda cuadrada con la misma frecuencia de la línea. El objetivo de dicho acondicionamiento es modificar esa onda cuadrada por un tren de pulsos angostos al doble de la frecuencia de la línea, los cuales aparecen cada que haya un flanco de subida o de bajada en la onda original, para que el circuito de control del sistema los detecte con mayor facilidad.

Figura 1.2. Cruces por cero de la señal de voltaje original.



Y el disparo sincronizado se asegura generando una señal portadora diente de sierra o triangular a partir de la señal de voltaje de la línea de alimentación y al doble de la frecuencia de la misma, y comparándola con una tensión de control DC generada por el circuito de control, la cual, corresponde al ángulo de disparo deseado para los tiristores. En el siguiente esquema se puede apreciar un diagrama de bloques acerca de cómo se generan los pulsos de disparo de los tiristores:

Figura 1.3. Diagrama de bloques del circuito genera los pulsos de disparo de los tiristores.

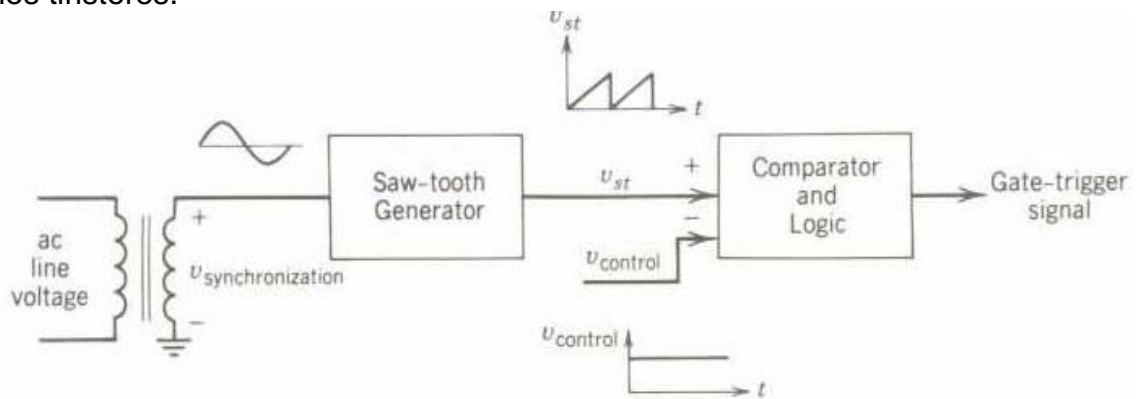
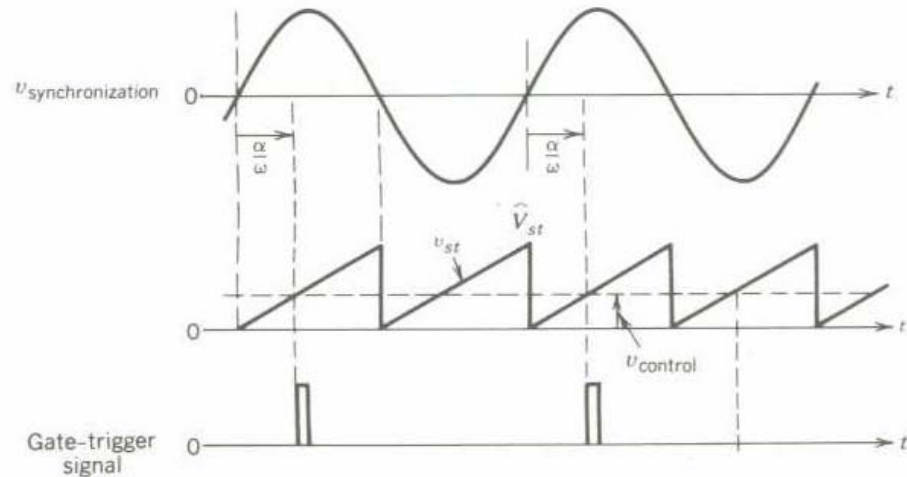


Figura 1.4. Señales a partir de las cuales se generan los pulsos de disparo.



El ángulo de disparo puede obtenerse en función de la tensión DC de control mediante la siguiente relación:

$$\alpha = 180^\circ * \frac{V_{\text{Control}}}{V_{st}}$$

Donde V_{st} corresponde al valor pico de la señal diente de sierra que actúa como portadora.

Las formas de onda que se obtienen cuando funciona un Rectificador Semi-controlado con un ángulo de disparo cualquiera son:

Figura 1.5. Formas de onda de voltaje del Rectificador monofásico semi-controlado.

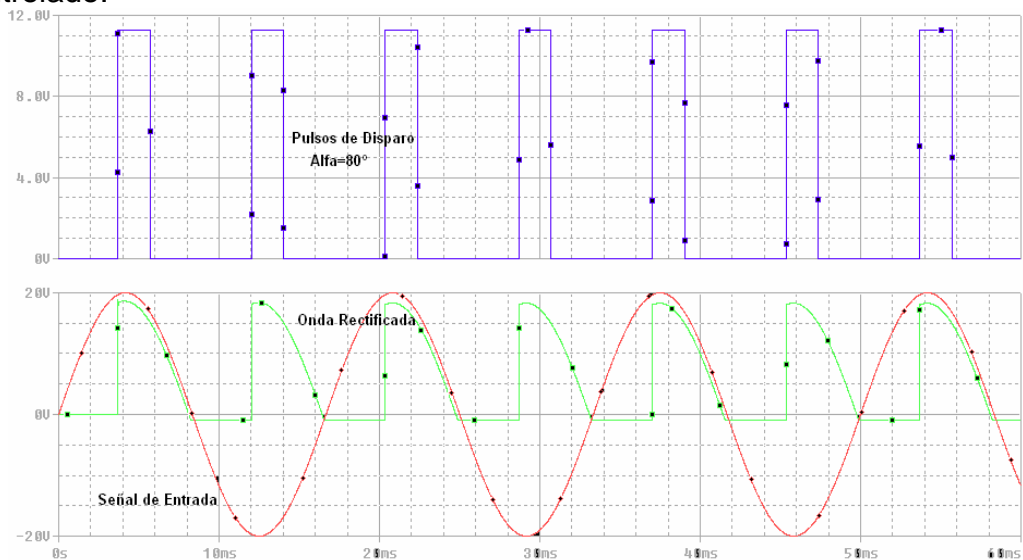
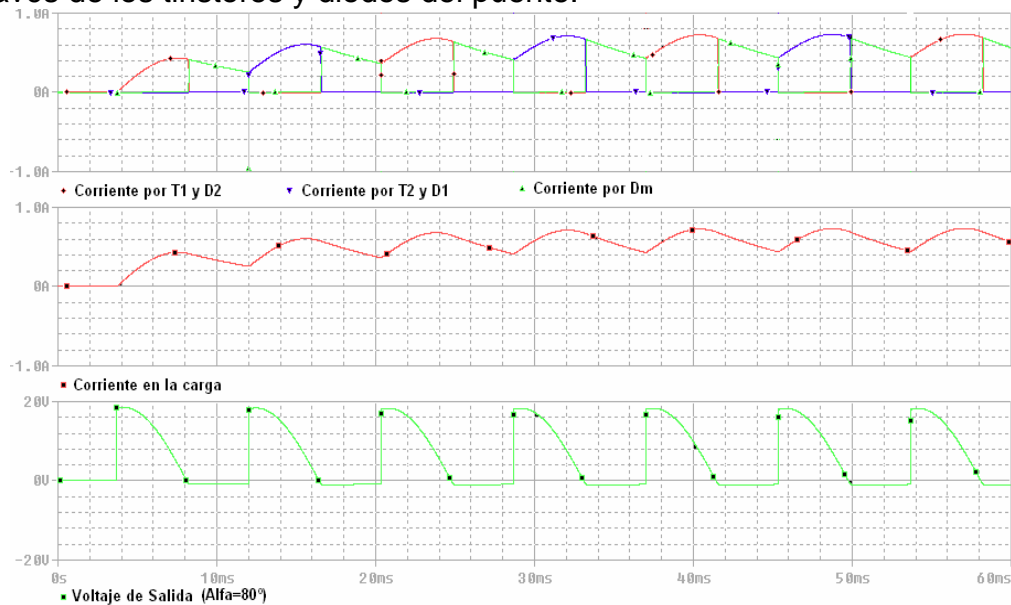


Figura 1.6. Curva que muestra la corriente en la carga y la corriente que circula a través de los tiristores y diodos del puente.



Cuando la carga es resistiva, las ondas de voltaje y de corriente están en fase y cruzan por cero en el mismo instante de tiempo; por lo tanto, en dicho instante se recorta la onda de voltaje rectificada y la circulación de corriente en el circuito desaparece. Cuando la carga es inductiva, la onda de voltaje se desfase con la onda de corriente y el cruce por cero de ambas señales no ocurre en el mismo instante de tiempo, incluso si la carga es altamente inductiva, la onda de corriente ni siquiera cruza por cero; pero debido a que la topología tiene mitad tiristores y mitad diodos, al invertirse la polaridad en las terminales de los diodos, éstos automáticamente se desactivan y la onda de voltaje se corta, aunque la circulación de corriente no desaparece porque ésta aún no ha llegado a cero. Por tal motivo, se necesita del diodo de rueda libre para que la corriente que aún está circulando, recircule entre la carga y este diodo hasta que llegue a cero, o en su defecto hasta que el otro tiristor entre en conducción, tal y como puede verse en la figura 1.6.

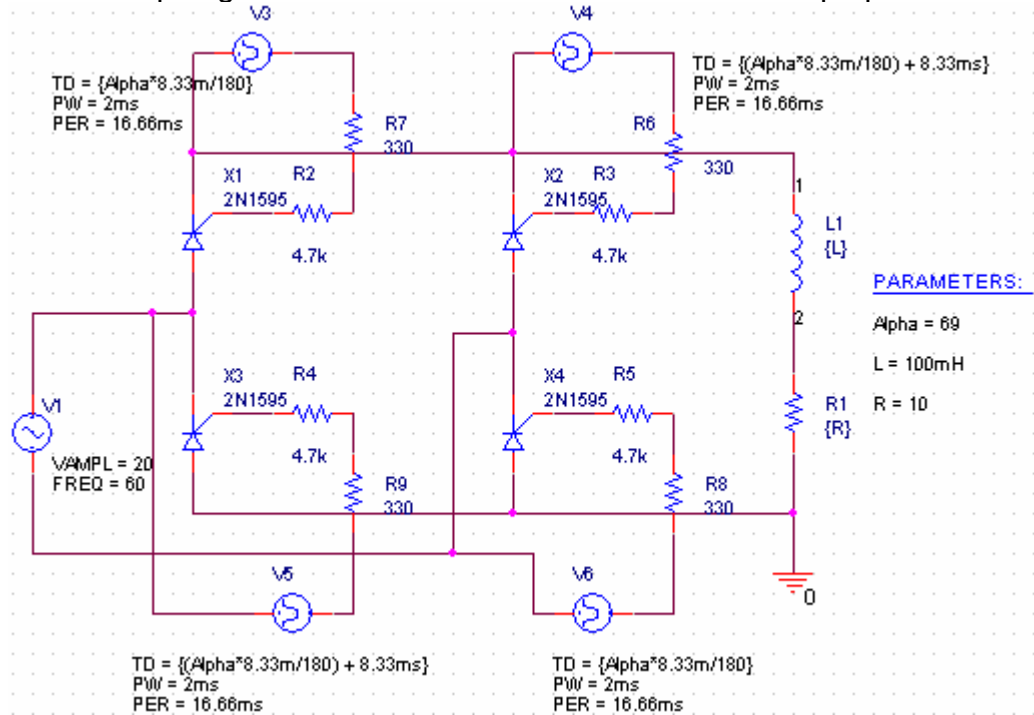
El rango de valores permitido para disparar los SCR's y obtener un voltaje positivo a la salida es, en teoría, entre 0 y 180°. Cabe anotar que utilizando esta topología no es posible obtener voltajes negativos a la salida, porque los diodos de la parte baja del puente no lo permiten.

1.2. RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO

La topología es la misma del rectificador semi-controlado tipo puente, pero con la diferencia que utiliza 4 tiristores en el puente y no mitad diodos y mitad tiristores, además que tampoco utiliza diodo de rueda libre. La ventaja es que permite control total sobre la misma y por ende, el flujo de potencia puede ser en ambas direcciones, es decir, puede funcionar como rectificador, con ángulos de disparo menores a 90° para obtener una tensión positiva y con ángulos de

disparo mayores a 90° y una carga altamente inductiva para obtener una tensión negativa; y como inversor, con ángulos de disparo superiores a 90° y la fuente de DC conectada en la salida del rectificador.

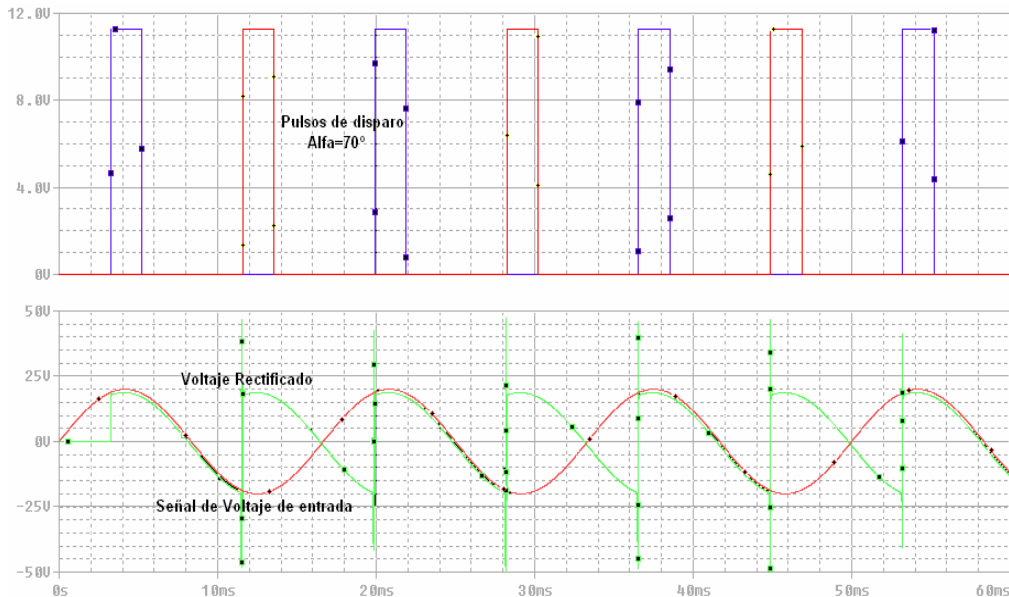
Figura 1.7. Topología del rectificador totalmente controlado tipo puente.



En cuanto al principio de funcionamiento, es muy similar al del circuito anterior pero con la diferencia que se deben disparar de a dos tiristores a la vez para cada semiciclo y no solamente uno; los tiristores que se disparan son los contrarios, por ejemplo, para el semiciclo positivo T_1 y T_4 y para el negativo T_2 y T_3 . Igualmente se deben detectar los cruces por cero de la onda de voltaje para saber el momento exacto donde se debe generar el ángulo de retraso para disparar los tiristores y se deben sincronizar los pulsos de disparo de los dispositivos con la línea de alimentación de la misma manera que en el circuito anterior.

Las formas de onda que se obtienen con esta topología son:

Figura 1.8. Formas de onda del Rectificador Totalmente Controlado Monofásico.



Cuando la carga es resistiva, el funcionamiento de la topología es similar al Rectificador Semi-controlado porque al no haber desfase entre el voltaje y la corriente, cada SCR deja de conducir cuando ambas ondas llegan a cero. Pero cuando la carga es inductiva, la onda de voltaje cruza por cero mucho antes que la onda de corriente o muchas veces, la onda de corriente ni siquiera cruza por cero, por lo tanto, aparecen tensiones instantáneas negativas en la carga porque los SCR's permanecen conduciendo hasta que la onda de corriente disminuya, sin importar que la polaridad entre el ánodo y el cátodo se invierta.

Si el ángulo de disparo es menor a 90° , aunque haya tensiones negativas instantáneas, el voltaje promedio de salida es positivo porque durante la mayor parte del ciclo las tensiones instantáneas fueron positivas. Y si el ángulo de disparo es mayor a 90° , la tensión de salida promedio es negativa porque durante la mayor parte del ciclo las tensiones instantáneas fueron negativas. Por ejemplo, si el ángulo de disparo es de 60° (como puede verse en la figura 1.9) la tensión de salida es positiva, porque aunque haya gran parte del ciclo donde las tensiones instantáneas son negativas, puede verse que la parte positiva tiene una mayor duración.

Figura 1.9. Curva que muestra la corriente que circula en la carga y a través de los tiristores del puente para un ángulo de disparo de 60° .

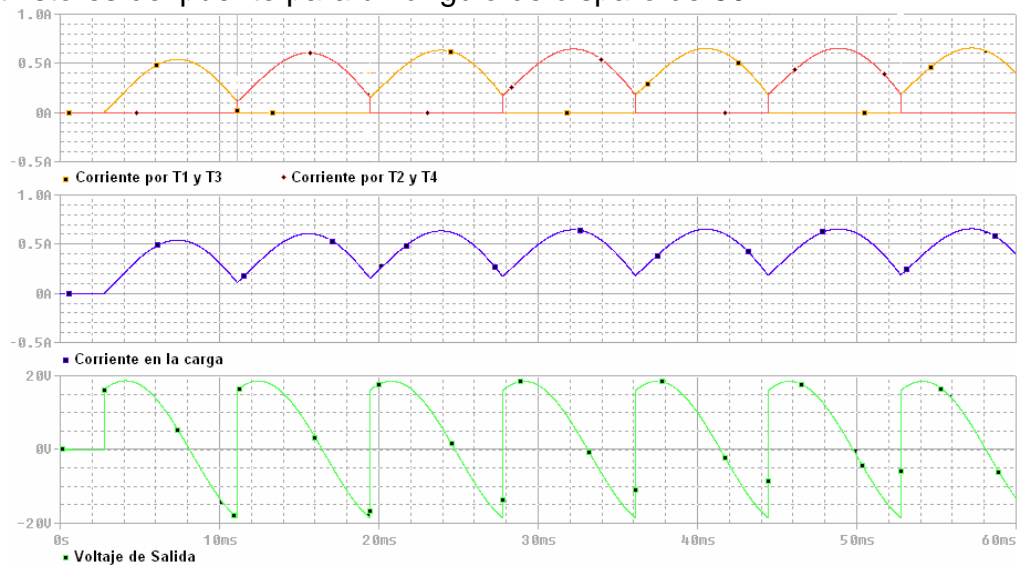
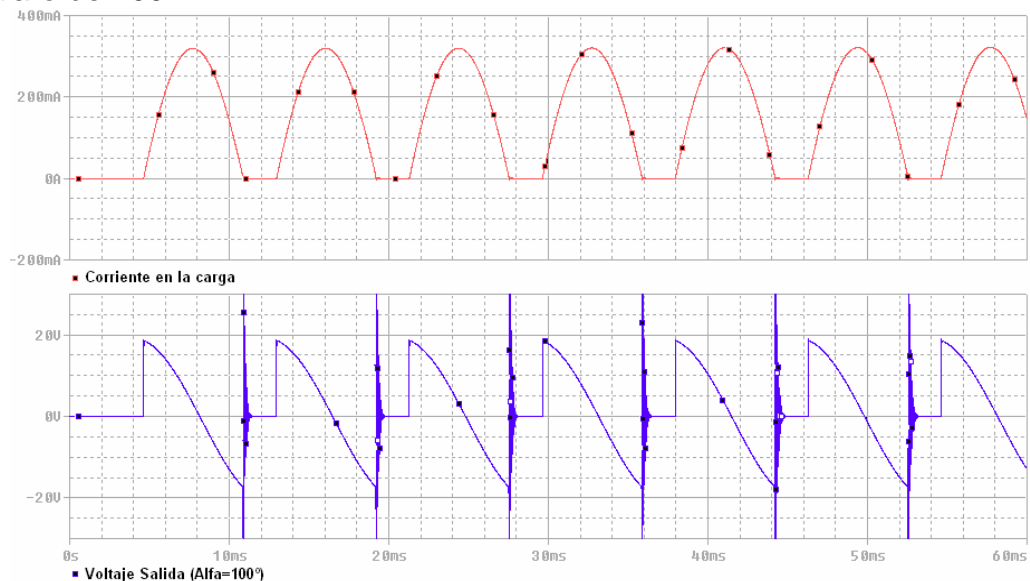


Figura 1.10. Curva que muestra la corriente en la carga para un ángulo de disparo de 100° .



Como puede verse en la figura 1.9, para ángulos de disparo pequeños (menores a 70° aproximadamente) la corriente en la carga es continua y por ende nunca cruza por cero. Por tal motivo, el SCR que se encuentra conduciendo debe desactivarse por la polarización y el disparo del tiristor siguiente y no por el cruce de la corriente que nunca ocurre, debido a que en dicho instante, las ondas de voltaje tienen mayor amplitud para éste y no para el que se encontraba conduciendo.

Cabe anotar que aunque la onda de corriente sea continua, ésta presenta rizado por la carga y descarga de la inductancia que produce el adelanto de la misma con respecto al voltaje (o el atraso del voltaje con respecto a la

corriente). A medida que el ángulo de disparo es mayor el rizado de corriente también lo es.

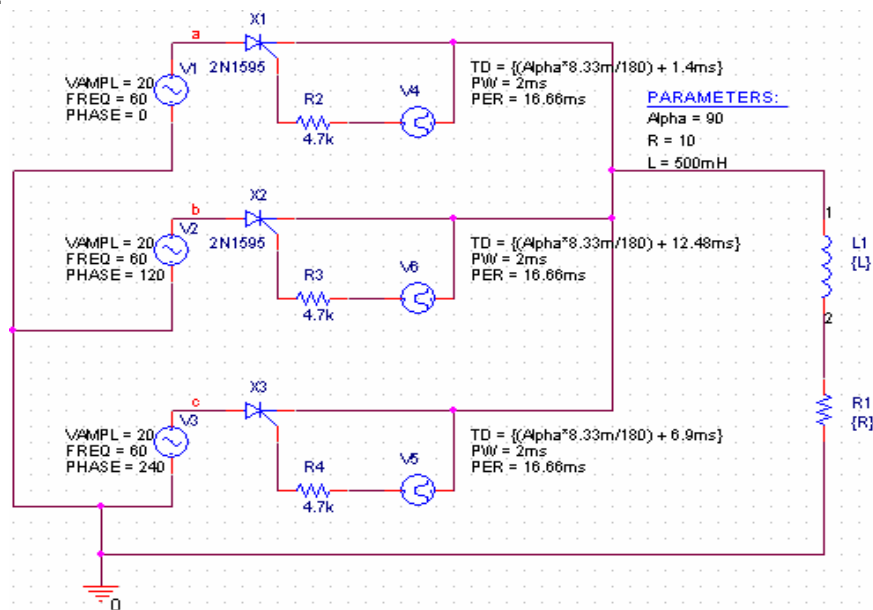
Y para ángulos de disparo mayores a 70° aproximadamente, tal y como puede verse en la figura 1.10, la onda de corriente es discontinua porque cruza por cero en un punto determinado. A medida que el ángulo de disparo es mayor, la discontinuidad en la onda de corriente también lo es, ya que en muchas ocasiones la corriente llega a cero, el tiristor que se encuentra conduciendo se desactiva y el tiristor que debe seguir de acuerdo a la secuencia no se activa; en esos momentos no hay flujo de corriente por el circuito y tampoco tensión a la salida, al menos hasta que dicho tiristor entre en conducción. Lo anterior ocurre porque la inductancia de la carga no es muy alta y permite que la onda de corriente llegue a cero mucho antes del tiempo que debe transcurrir para que el SCR que sigue en la secuencia, sea disparado por el sistema de control con un ángulo de disparo determinado.

A medida que aumenta el valor de la inductancia, la discontinuidad de la onda de corriente disminuye. En otras palabras, la discontinuidad en la corriente depende del valor de la inductancia y del ángulo de disparo con el cual se trabaje el circuito.

1.3. RECTIFICADOR CONTROLADO TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA (RECTIFICADOR DE 3 PULSOS)

La topología de este rectificador ya es diferente a las anteriores, debido a que no es un rectificador de onda completa. Se compone básicamente de tres rectificadores de media onda con SCR's conectados cada uno en cada una de las fases de la línea de AC, tal y como se muestra en la siguiente figura:

Figura 1.11. Topología del rectificador trifásico de media onda o rectificador de 3 pulsos.



Con este circuito se rectifica solamente el semiciclo positivo de las señales de voltaje de cada fase, por lo tanto, su eficiencia no es buena (menor al 50%) debido a que se desperdicia el semiciclo negativo. Pero por otra parte, presenta dos ventajas con respecto al rectificador de onda completa monofásico: la primera es que al obtener tres señales pulsantes separadas cada una 120° y no dos separadas 180° , como ocurre con el rectificador de onda completa monofásico, sus requisitos de filtrado son mucho menores, por lo tanto, los componentes LC para formarlo son de menor tamaño; y la otra es que es mucho mejor para cargas que tienen un alto consumo de potencia porque extrae la energía de las tres fases y no solo de una, evitando que el sistema pueda quedar desbalanceado.

El principio de funcionamiento es el siguiente: debe detectarse el instante exacto en el que ocurren cruces entre dos fases cualesquiera durante el semiciclo positivo de las señales (y no del negativo por que dicho semiciclo no se va a rectificar), ya que a partir de ese momento, se comienza a generar el ángulo de retraso para disparar cualquiera de los tiristores. El tiristor que se debe disparar debe ser el que está conectado a la fase que tiene mayor amplitud de las dos que se cruzan. Por ejemplo: se cruzan las fases *a* y *b* en un instante dado; la fase *a* va aumentando su amplitud mientras que la fase *b* viene disminuyendo, por lo tanto, el tiristor que se debe disparar es T_1 que es el que está conectado a la fase *a*. En ese momento, la tensión de fase V_{an} aparece entre la carga y el punto neutro del sistema.

Luego, ocurre un cruce entre la fase *c* que viene aumentando su amplitud y la fase *a* que ya viene disminuyendo (porque ya se encontró con la fase *b* cuando aumentaba); por lo tanto, debe dispararse el Tiristor T_3 para que aparezca la tensión V_{cn} entre la carga y el neutro del sistema. Y finalmente, cuando se cruzan las dos fases que faltan, es decir, fases *b* y *c*, la fase *c* viene ya disminuyendo y la fase *b*, que ya disminuyó y llegó a su mínimo valor, está aumentando nuevamente; por lo tanto, el tiristor que debe dispararse es T_2 para que aparezca la tensión V_{bn} entre la carga y el neutro.

Por lo tanto, la secuencia de conmutación de los tiristores es $T_1 - T_3 - T_2$ y volver a empezar otra vez con T_1 , para que aparezca primero la tensión V_{an} , luego la tensión V_{cn} y finalmente, la tensión V_{bn} entre fase y el punto neutro del sistema.

Las formas de onda que se generan son las siguientes:

Figura 1.12. Formas de onda en un rectificador de 3 pulsos para una carga inductiva.

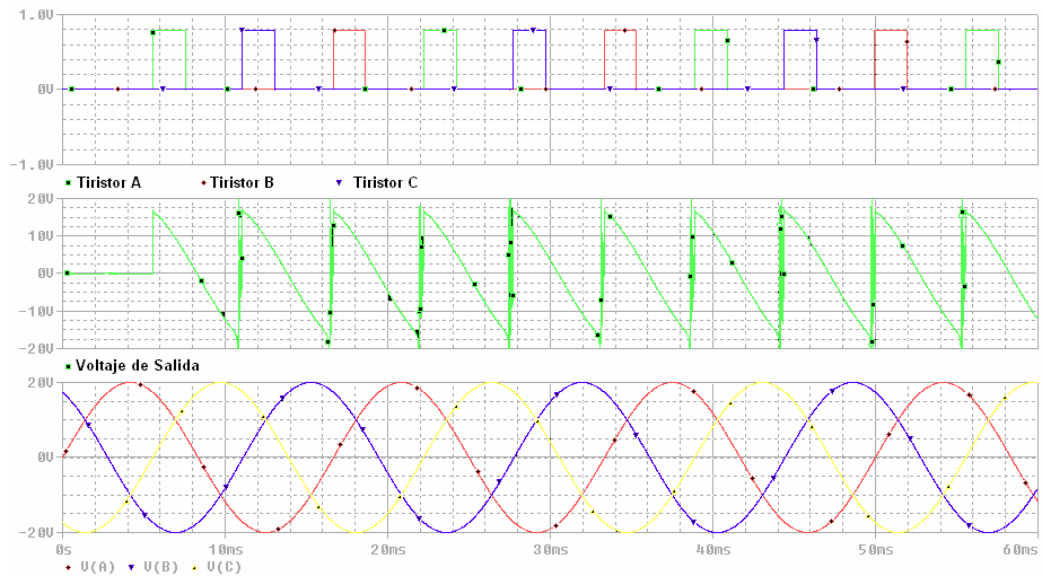
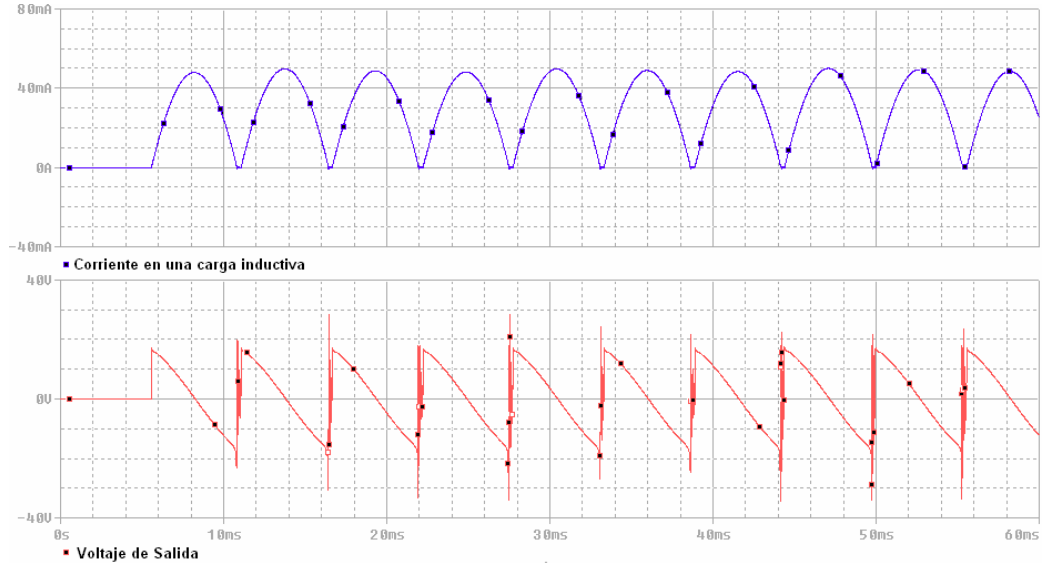


Figura 1.13. Curva de corriente en una carga inductiva frente a la tensión de salida.



La forma en la cual debe realizarse el disparo de los SCR's debe ser sincronizada, no con los cruces por cero de cada una de las tensiones de fase del sistema (como ocurre con las topologías anteriores), sino con los cruces que se presentan entre ellas. Por lo tanto, es necesario primero, identificar los cruces entre fases en el semiciclo positivo (y no los cruces por cero) para indicar al circuito de control el instante donde debe comenzar a generar el retraso en el disparo de los tiristores. Esto es necesario porque a partir de dicho instante, se deben empezar a generar tres señales portadoras diente de sierra separadas cada una 120° de la otra (debido a que cada 120° es que se generan los cruces en el semiciclo positivo), para comparar cada una con la tensión DC de control correspondiente al ángulo de disparo deseado. Aunque cada portadora tiene una duración de 180° , la comparación entre ésta y la

tensión de control debe realizarse durante los primeros 90° de la misma, debido a que si se disparan los tiristores con un ángulo mayor, la tensión promedio de la onda que se genera es negativa.

En las siguientes figuras se muestran los pulsos que llegan al circuito de control indicando los cruces entre fases y la forma como a partir de dicho cruce, se generan los pulsos para disparar los tiristores con un ángulo de disparo determinado.

Figura 1.14. Tren de pulsos angostos que identifican los cruces entre dos fases cualesquiera, en el semiciclo positivo. Se tienen 3 pulsos por cada periodo completo debido que durante éste se presentan 3 cruces entre fases.

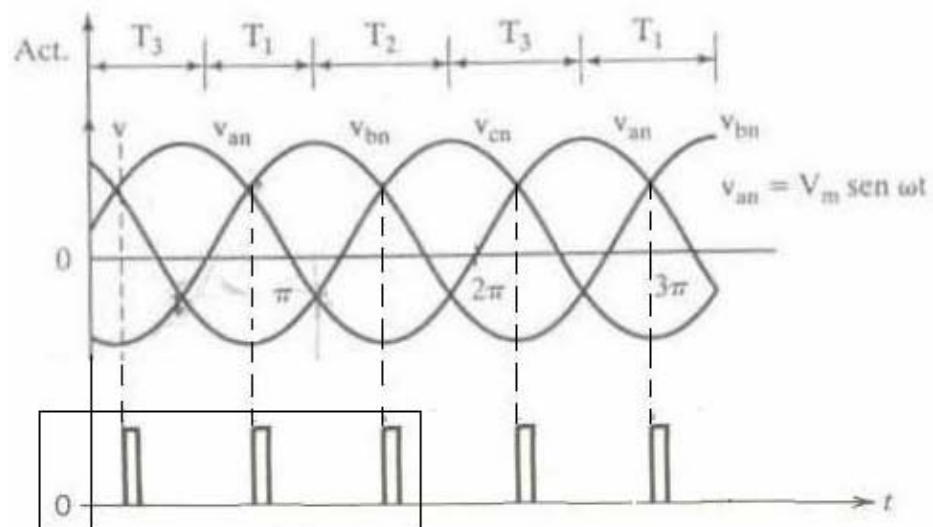
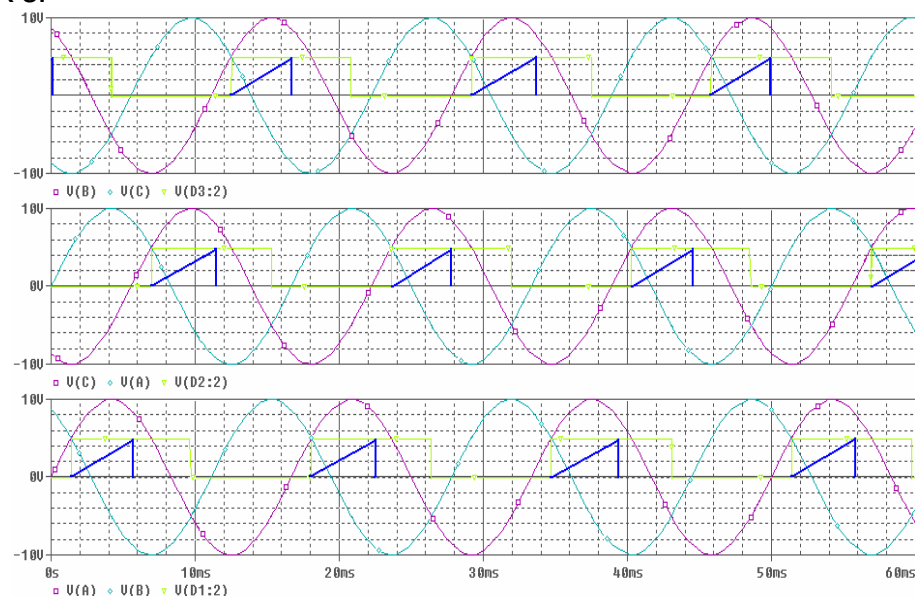


Figura 1.15. Formas de onda que muestran cómo se generan las portadoras que al compararse con la tensión de control, generan los pulsos de disparo de los SCR's.

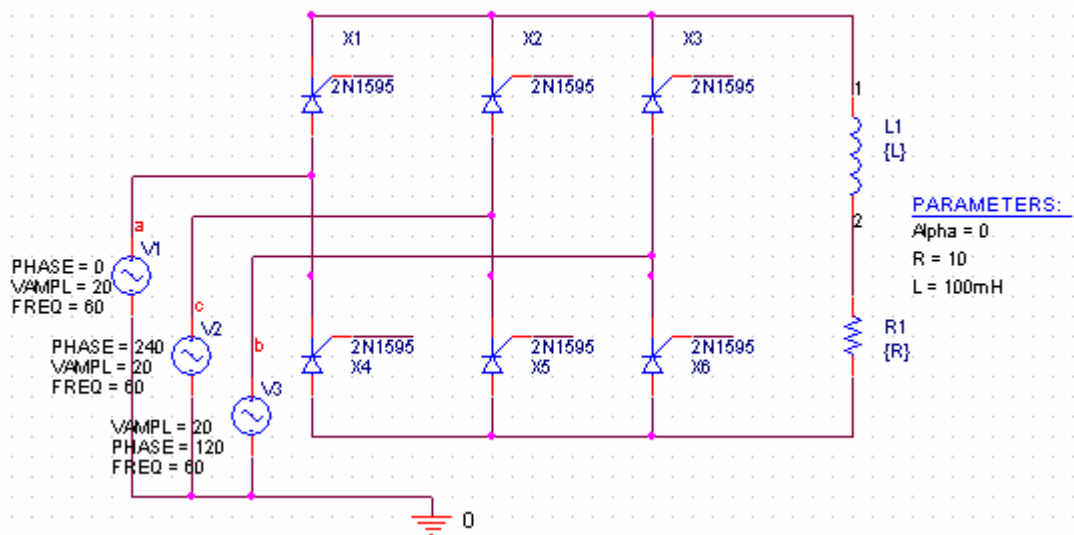


1.4. RECTIFICADOR CONTROLADO TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA (RECTIFICADOR DE 6 PULSOS)

Esta topología es similar al rectificador monofásico puente completo (onda completa) y consiste en un puente de tiristores con una rama adicional, donde cada una de dichas ramas va conectada a una fase del sistema.

La conexión correcta de las fases al circuito para que el funcionamiento de éste sea el adecuado es: La Rama 1, conformada por los tiristores Q_1 y Q_4 va conectada a la fase a , la cual se asume con un ángulo de desfase de 0° , ya que es la fase de referencia para medir los desfases de las otras dos fases. La Rama 2, que contiene los tiristores Q_3 y Q_6 debe conectarse a la fase c que es la que tiene un ángulo de desfase de 240° con respecto a la fase a . Y la Rama 3, que está formada por los tiristores Q_5 y Q_2 debe conectarse a la fase b que es la que tiene un ángulo de desfase de 120° con respecto de a . Si las fases no son conectadas de esta manera el funcionamiento del circuito no es el adecuado y la secuencia normal de conmutación no funciona.

Figura 1.16. Topología del rectificador trifásico de onda completa o de 6 pulsos.



Como puede verse en la figura 1.16, la carga se conecta a los dos puntos de salida del puente rectificador (punto de ánodos comunes y punto de cátodos comunes), por lo tanto, se tiene la posibilidad de obtener en sus terminales una tensión de línea (la cual es medida entre dos fases) y no simplemente una tensión de fase (medida entre fase y el punto neutro del sistema) como en las otras topologías, lo que permite la posibilidad de obtener una tensión de DC mayor, debido a que las tensiones de línea tienen mayor amplitud que las tensiones de fase.

Su principio de funcionamiento es el siguiente: Se deben disparar de a dos tiristores a la vez para poder generar un camino que permita la circulación de corriente entre dos de las fases del sistema y la carga, y además, se debe generar una secuencia de disparo adecuada para que aparezcan en la carga las crestas de las ondas de voltaje. Para realizar esto, es necesario identificar

los instantes exactos donde se presentan cruces entre dos fases cualesquiera, tanto en el semiciclo positivo como en el negativo, porque a partir de dichos instantes se debe realizar la conmutación de los tiristores y por ende, se debe generar el ángulo de retraso en el encendido de los mismos.

Cuando se presenta un cruce entre dos fases cualesquiera, se deben disparar los tiristores que estén conectados a las dos fases con mayor amplitud absoluta en dicho instante, donde el tiristor de arriba es el que está conectado a la fase de amplitud positiva y el de abajo a la fase con amplitud negativa. Por ejemplo: se presenta un cruce en el semiciclo positivo entre la fase *a* que viene aumentando su amplitud y la fase *b* que viene disminuyendo la misma y en dicho instante, la fase *c* tiene una amplitud grande pero negativa; los tiristores que deben dispararse son aquellos que conectarían la carga con las fases *a* y *c* que son las que tienen mayor amplitud absoluta y por ende, su onda de tensión de línea se encuentra en su cresta, y además, teniendo en cuenta que el tiristor de arriba es el conectado a la fase *a* y el de abajo a la fase *c*, debido a la polaridad de las ondas de voltaje. Dichos tiristores son Q_6 y Q_1 .

Para el siguiente cruce (segundo), que es entre las fases *b* y *c* en el semiciclo negativo donde la fase *b* es la que aumenta y la fase *c* es la que disminuye, se deben disparar los tiristores que conectan la fase *a* con la fase *b*, que son las que tienen la mayor amplitud absoluta, pero teniendo en cuenta que la fase *a* es la positiva. Los tiristores que permiten obtener en la carga la tensión de línea V_{ac} son Q_1 y Q_2 . El tercer cruce encuentra a las fases *c* y *a* en el semiciclo positivo, donde la fase *c* es la que aumenta su amplitud y la fase *a* ya va disminuyendo; por tal motivo, las fases con mayor amplitud absoluta son: *c* que aumentó y *b* que se encuentra en el semiciclo negativo. Por lo tanto, deben dispararse los tiristores Q_2 y Q_3 para conectar dichas fases teniendo en cuenta que la de amplitud positiva es la *c* (Tiristor Q_3) y la de amplitud negativa es la *b* (Tiristor Q_2).

El cuarto cruce encuentra nuevamente a las fases *a* y *b*, pero ahora en el semiciclo negativo; la fase que aumenta su amplitud es nuevamente la fase *a* y la que disminuye es la *b*, mientras que la fase *c* se encuentra en el semiciclo positivo con una amplitud grande, por lo tanto, las que tienen la mayor amplitud absoluta son las fases *a* y *c*. Por tal motivo, deben dispararse los tiristores Q_3 y Q_4 para conectar con la carga las fases *a* y *c* de tal manera que el Tiristor conectado a la fase *c* sea uno de los de la parte de arriba del puente (Tiristor Q_3).

En el quinto cruce, las fases encontradas son *b* y *c* nuevamente y la fase *b* es la que está aumentando su amplitud mientras *c* la disminuye, tal y como ocurrió en el cruce anterior de estas mismas dos fases; pero la diferencia es que ahora el cruce se presenta en el semiciclo positivo, lo que hace que la fase *b* sea la que tenga amplitud positiva y uno de los tiristores que se dispare sea el que se encuentra en la parte de arriba del puente y que a la vez, se encuentre conectado a ella (Tiristor Q_5). El otro tiristor corresponde al que está conectado a la fase *a* (Tiristor Q_4) que es la que tiene amplitud absoluta grande. Por tal motivo, los tiristores a dispararse en este instante son Q_4 y Q_5 .

Y finalmente, en el sexto cruce se encuentran en el semiciclo negativo la fase *a* que viene disminuyendo su amplitud y la fase *c* que la viene aumentando. Por tal motivo, las fases de amplitud absoluta mayor son *c* y *b*, donde *b* es la que tiene la amplitud positiva, así que los tiristores a disparar son Q_5 y Q_6 para conectar la fase *b* positiva por medio del tiristor de arriba y la fase *c* negativa con el tiristor de abajo.

Por lo tanto, la secuencia de disparo de los tiristores para rectificar las crestas de las tres ondas de voltaje durante un periodo completo es la siguiente: 6-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 y vuelve y comienza el ciclo con 6-1, donde los tiristores 1, 3 y 5 están conectados siempre a la fase con polaridad positiva y los tiristores 2, 4 y 6 a la de polaridad negativa.

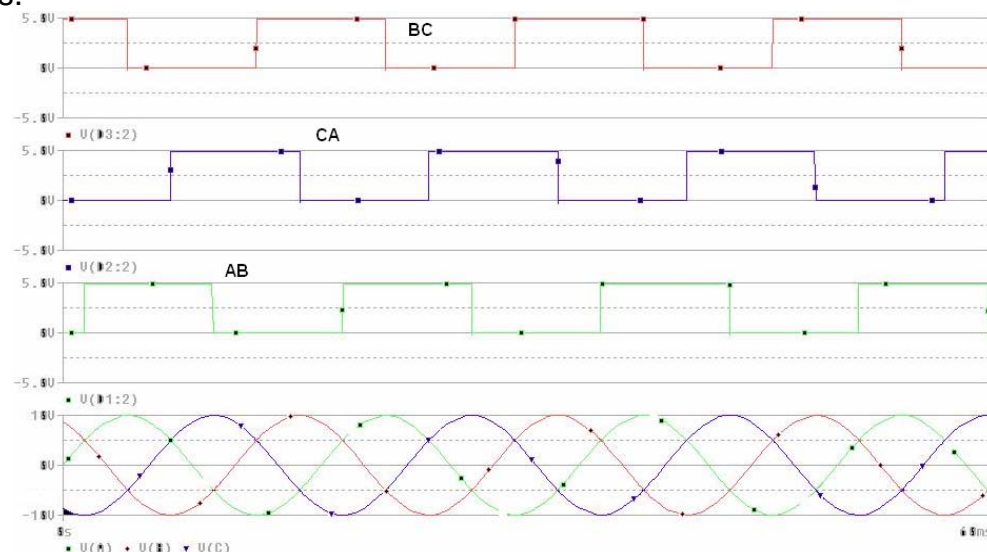
La siguiente tabla resume el comportamiento descrito:

Tabla 1.1. Comportamiento del circuito rectificador de 6 pulsos.

Cruces	Fases que se cruzan	Disparos	Fases conectadas	Estado de las señales		
				AB	CA	BC
1	A-B	6 y 1	A-C	1	0	1
2	B-C	1 y 2	A-B	1	0	0
3	C-A	2 y 3	C-B	1	1	0
4	A-B	3 y 4	C-A	0	1	0
5	B-C	4 y 5	B-A	0	1	1
6	C-A	5 y 6	B-C	0	0	1

Las señales “AB”, “CA” y “BC” son las ondas cuadradas que representan los cruces entre las fases y por ende, permiten identificar los instantes exactos donde estos ocurren; dichas señales pueden visualizarse en la siguiente figura:

Figura 1.17. Formas de Onda cuadradas que representan los cruces entre las fases.



En la siguiente figura se muestran las formas de onda que se generan al disparar los SCR's en la secuencia descrita y con un ángulo de disparo cualquiera.

Figura 1.18. Forma de onda al disparar el circuito con un ángulo de 0° (cuadro medio) y con un ángulo de 35° (cuadro superior).

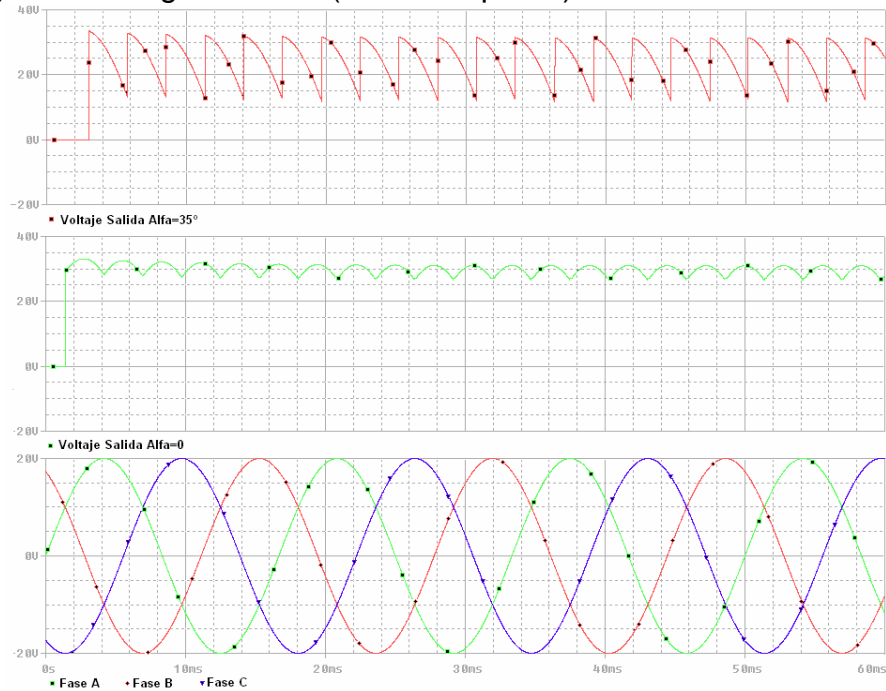
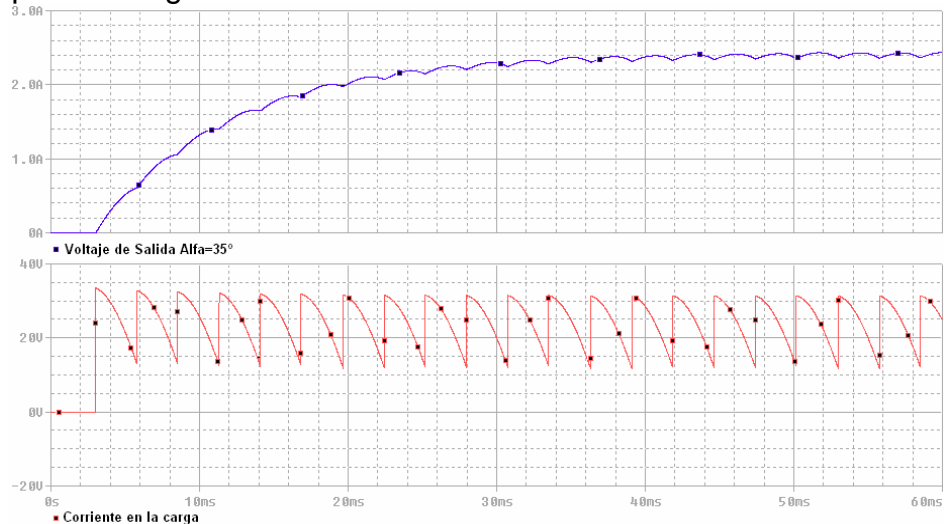


Figura 1.19. Curva que muestra la corriente en la carga frente al voltaje de salida, para un ángulo de 35° .



Para disparar satisfactoriamente los SCR's es necesario, como en la topología anterior, hacerlo de manera sincronizada con los cruces entre las fases del sistema, pero a diferencia del rectificador de tres pulsos, se toman en cuenta todos los cruces entre fases y no solo los del semiciclo positivo. Por lo tanto, deben obtenerse los instantes exactos donde ocurren estos cruces para

indicarle al circuito de control el momento preciso para generar las portadoras diente de sierra por cada fase. Los cruces entre dos fases cualesquiera aparecen cada 60° , por lo tanto, los pulsos que indican la ocurrencia de un cruce tienen la misma frecuencia.

Las portadoras que se generan para realizar el disparo sincronizado comienzan cuando se genera el primer cruce entre dos fases cualesquiera en el semiciclo positivo y se terminan cuando esas dos mismas fases se vuelven a cruzar en el semiciclo negativo. Por ejemplo: vienen las fases a y c , donde la a va aumentando su amplitud y la c va disminuyendo; al momento exacto donde se cruzan se debe comenzar a generar la portadora, que finaliza abruptamente cuando se detecta el siguiente cruce entre las mismas dos fases, es decir, cuando la fase a vaya disminuyendo y la fase c aumentando.

En total, se tienen 90° disponibles para realizar el disparo de cada pareja de SCR's que permiten que aparezca una tensión de línea positiva cualquiera en la carga, los cuales, corresponden a la mitad de la duración de las portadoras que sincronizan los cruces entre fases, ya que éstas tienen una duración de 180° correspondientes a la separación entre los cruces positivo y negativo de las mismas fases. Si se excede el ángulo de disparo a 90° se comienzan a generar tensiones promedio negativas en los terminales del puente rectificador y éste se convierte en un inversor, al que conectándole una fuente de DC invertida en lugar de carga puede comenzar a generar potencia de AC.

Las siguientes dos figuras muestran los pulsos que indican la ocurrencia de un cruce y las portadoras que deben generarse cuando esto ocurre.

Figura 1.20. Pulsos que indican los cruces entre fases tanto en el semiciclo positivo como en el negativo. Son 6 pulsos por cada periodo completo debido a que se presentan 6 cruces.

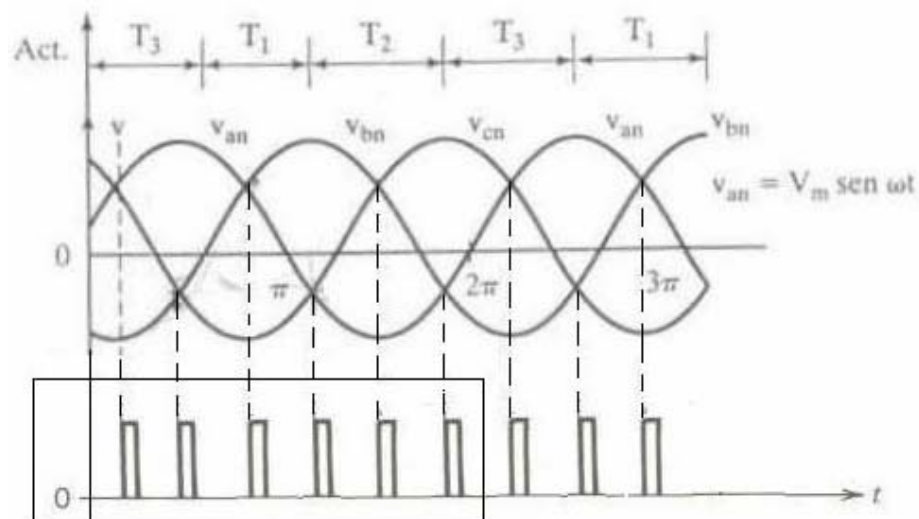
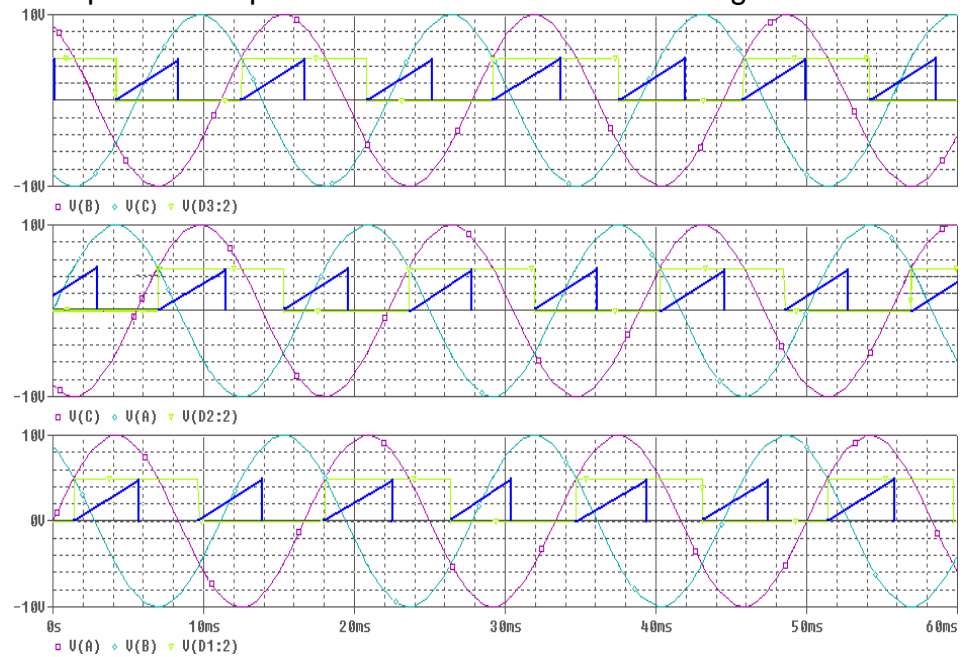


Figura 1.21. Portadoras que se deben generar a partir de los cruces entre 2 fases para el rectificador de 6 pulsos. A diferencia del rectificador de 3 pulsos, se generan portadoras para los cruces en el semiciclo negativo también.



2. MICROCONTROLADOR PIC 18F458

Un microcontrolador es un circuito integrado que contiene en su interior las tres unidades funcionales básicas de una computadora: CPU, Memoria y unidades de Entrada y Salida. Se trata de un pequeño computador de propósito específico, con prestaciones muy limitadas y encapsulado en solo chip. Se diferencia de un microprocesador porque cuenta en su interior con los elementos que éste requiere para que pueda funcionar; en otras palabras, el microprocesador corresponde únicamente a la CPU de un sistema de cómputo, el cual se encarga de ejecutar instrucciones que se encuentran almacenadas en dispositivos de memoria y que además necesita interactuar con el medio mediante dispositivos externos de Entrada/Salida, mientras que el microcontrolador corresponde al sistema de cómputo completo ya que cuenta con tales dispositivos en su interior.

Debido al alto nivel de integración que maneja, un microcontrolador es un computador con prestaciones muy reducidas, tales como poca memoria, poca velocidad de procesamiento, CPU no muy poderosa, entre otras, pero en contra parte, proporciona ventajas al tener en su interior periféricos que facilitan su funcionamiento. Debido a que son diseñados para aplicaciones muy específicas, no requiere que sus prestaciones sean tan elevadas como las de un microprocesador de propósito general.

Los microcontroladores PIC o PICmicro (Peripheral Interface Controller) corresponden a una gran familia de microcontroladores desarrollados por la compañía Microchip Technology Inc, derivados del PIC1650 desarrollado originalmente por la división de Microelectrónica de General Instruments en 1975 (división que diez años después se transformaría en la compañía que hoy produce los microcontroladores PIC). El primer microcontrolador PIC se diseñó con el objetivo de realizar las operaciones de entrada y salida de la CPU de 16 bits CP16000, y así optimizar el rendimiento del sistema.

Los microcontroladores PIC pueden dividirse en 5 grandes familias diferentes agrupadas en 4 gamas, las cuales, se clasifican de acuerdo a sus capacidades de procesamiento, velocidad y prestaciones.

- Familia PIC10F2XX. Corresponde a los microcontroladores PIC de gama baja, los cuales manejan palabras de 8 bits para ejecutar instrucciones, además de una cantidad pequeña de periféricos adicionales.
- Familia PIC12C(F)XXX. Corresponde a una de las familias que conforman la gama media de microcontroladores PIC, los cuales son diseñados para aplicaciones muy específicas en donde altas capacidades de procesamiento y gran cantidad de prestaciones no son necesarias. Manejan tamaños de palabra de 12 ó 14 bits para realizar cálculos y operaciones lógico - aritméticas y se caracteriza porque todos los microcontroladores pertenecientes a esta familia

- son únicamente de 8 pines. La letra C o F que se incluye en la referencia del microcontrolador se refiere a si la memoria de datos es tipo EPROM (C) o si es tipo Flash (F).
- Familia PIC16C(F)XXX. Microcontroladores cuya CPU maneja instrucciones de 14 bits para realizar cálculos y operaciones lógico - aritméticas; corresponde a la gama media de microcontroladores PIC. Aunque su CPU no es muy poderosa, su fuerte se encuentra en la cantidad de periféricos que contiene internamente, los cuales permiten que estos dispositivos sean muy utilizados para diferentes aplicaciones. Cuenta con módulos Timers, conversores Análogos – Digitales (ADC's), comparadores análogos, módulos PWM, manejo de interrupciones, comunicaciones vía serial, entre otros.
- Familia PIC18C(F)XXX. Son conocidos como microcontroladores de gama alta o de alto desempeño, debido a que contienen una CPU poderosa e incluyen gran cantidad de periféricos para proporcionar altas prestaciones. La CPU maneja palabras de 16 bits para ejecutar instrucciones y realizar operaciones lógico – aritméticas, aunque físicamente, el bus sea de únicamente 8 bits. Incluye periféricos tales como Conversores Análogos – Digitales de 12 bits, Temporizadores – Contadores, comparadores análogos, módulos PWM programables, diferentes fuentes de interrupción organizadas por prioridades, buses de comunicaciones seriales simples, tales como RS232, o más complejos como el I²C, CAN, USB, entre otros; comunicación paralela con otros dispositivos, entre otros. Pueden manejar osciladores externos de hasta 40Mhz, para obtener una instrucción o ciclo de máquina cada 10Mhz.
- Familia dsPIC. Son microcontroladores de 16 bits diseñados para aplicaciones específicas de procesamiento digital de señales; también son conocidos como DSP's. Debido a que sus aplicaciones requieren alto nivel de procesamiento y alta velocidad, la CPU de estos dispositivos es mucho más poderosa que la de los otros microcontroladores PIC, y adicionalmente, cuentan en su interior con Hardware especializado para realizar operaciones tales como, multiplicaciones de 16 bits, divisiones y otras que requieren un alto poder de cómputo en la CPU, con el objetivo de liberarla para otras tareas. Son los únicos microcontroladores PIC que manejan un bus de instrucciones de 16 bits directamente.

El microcontrolador PIC18F458 de Microchip es un dispositivo que pertenece a una de las familias de microcontroladores PIC de gama alta, PIC18FXX8, la cual cuenta principalmente con una poderosa CPU que maneja palabras de 16 bits para ejecutar instrucciones y realizar los cálculos y operaciones lógicas - aritméticas requeridas. Permite una memoria de programa Flash direccionable hasta 2Mbytes y memoria RAM de datos direccionable hasta 4Kbytes, señal de reloj externa máxima de 40MHz con un divisor de frecuencia interno por 4, lo cual indica una frecuencia máxima de operación por cada ciclo de máquina de 10MHz o un tiempo de ejecución de 0.1us por cada ciclo.

Su arquitectura interna desde el punto de vista de memoria es tipo Harvard, razón por la cual maneja la memoria de programa por un bus y la memoria de datos por otro diferente, y por lo tanto, puede acceder a ambas de manera simultánea; de memoria segregada, ya que las memorias de programa y de datos son independientes la una de la otra, por tal motivo es posible tener direcciones repetidas en ambas memorias y diferenciar correctamente cuando se trata de una o de otra. Y de arquitectura abierta porque es posible direccionar más posiciones de memoria de las que internamente trae, es decir, se le permite conectar memoria externa, tanto de programa como de datos, para aplicaciones donde los requerimientos de ambas sean superiores a los tamaños que el microcontrolador por defecto trae.

Adicionalmente, cuenta con un set de instrucciones reducido (RISC) que maneja una cantidad considerable de éstas, las cuales, lo hacen fácil de utilizar y lo suficientemente completo para ejecutar procedimientos y realizar cálculos costosos, entre los cuales se encuentran: multiplicaciones de números de 8 bits y almacenar el resultado en un registro de 16 bits, divisiones entre un número de 16 bits y otro de 8 bits y almacenar el resultado en un registro de 8 bits, comparaciones de mayor (>), menor (<) e igual (=) y realizar saltos o bifurcaciones dependiendo de los resultados de las mismas.

Interiormente contiene los siguientes periféricos que permiten optimizar las operaciones de entrada y salida de datos y realizar otras operaciones adicionales:

- 4 Temporizadores – Contadores de eventos externos, de los cuales, dos son de 16 bits, otro es de 8 bits y el otro es programable y puede ser utilizado como temporizador de 8 ó 16 bits; cada temporizador está asociado a una interrupción que se produce cuando hay desborde.
- Módulos PWM de entrada y salida, con características avanzadas para control de motores tales como: polaridad de PWM seleccionable, tiempo muerto programable y varias salidas PWM a la vez.
- Interfaz de comunicación serial USART para comunicaciones RS232 síncronas y asíncronas, la cual se encuentra asociada a interrupciones para transmisión y recepción de datos.
- Interfaz de comunicación serial avanzada para comunicaciones SPI de tres líneas y comunicaciones I²C en modos maestro y esclavo.
- 8 Conversores Análogos – Digitales de 10 bits, con conversión disponible durante el modo Sleep y asociados a una interrupción cada que se va a realizar una lectura de un dato.
- Interfaz de comunicación CAN.
- Módulos Comparadores de dos señales Análogas.

- 3 fuentes de Interrupción externa por un flanco de subida o de bajada, según como se programe el dispositivo, en alguno de los pines predeterminados.
- Interrupción por la detección de algún cambio de nivel en los pines RB4 a RB7.
- 4 Interrupciones temporizadas.
- Interrupción de recepción serial en la USART.
- Interrupción para realizar la transmisión serial de un dato mediante la USART.
- Interrupción asociada a la conversión Análogo – Digital.
- Interrupción para el manejo del puerto paralelo esclavo.

La siguiente tabla resume las características del microcontrolador ya mencionadas:

Tabla 2.1 Características del microcontrolador PIC18F458.

Features		PIC18F458
Operating Frequency		DC - 40 MHz
Internal Program Memory	Bytes	32K
	# of Single Word Instructions	16384
Data Memory (Bytes)		1536
Data EEPROM Memory (Bytes)		256
Interrupt Sources		21
I/O Ports		Ports A, B, C, D, E
Timers		4
Capture/Compare/PWM Modules		1
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules		1
Serial Communications		MSSP, CAN, Addressable USART
Parallel Communications (PSP)		Yes
10-bit Analog-to-Digital Converter		8 input channels
Analog Comparators		2
Analog Comparators VREF Output		Yes
RESETS (and Delays)		POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)
Programmable Low Voltage Detect		Yes
Programmable Brown-out Reset		Yes
CAN Module		Yes
In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)		Yes
Instruction Set		75 Instructions
Packages		40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP

3. IMPLEMENTACIÓN

La implementación del Sistema de Entrenamiento en Rectificadores Controlados se llevó a cabo en tres partes o etapas: Una primera etapa correspondiente a la selección del dispositivo de control del sistema, en la cual, se analizaron diferentes alternativas de acuerdo a sus prestaciones y se escogió una de ellas. Una segunda etapa correspondiente al Hardware del sistema, en la cual se realizó el diseño, las pruebas y la implementación física de: los circuitos sensores para las diferentes topologías, el circuito de control, los circuitos driver's para el disparo de los SCR's y el circuito plataforma sobre el cual se conecta la topología a funcionar. Y una tercera etapa correspondiente al Software, en la cual se realizó el diseño arquitectural del sistema para determinar las funciones que se deben ejecutar y la co-relación entre ellas, tanto de manera global como detallada; se realizó la implementación de dichas funciones en el sistema de control mediante algoritmos y rutinas y se realizaron las pruebas de las mismas; adicionalmente, en esta etapa se desarrollo una interfaz gráfica de visualización, configuración y monitoreo para tener acceso al funcionamiento del sistema desde un PC.

A continuación, se dará una descripción más detallada de las tres etapas mencionadas en la implementación del sistema:

3.1. ETAPA DE SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CONTROL

En esta etapa se analizaron diferentes alternativas para implementar el dispositivo de control del sistema capaz de ejecutar las rutinas de control de los disparos para cada una de las topologías, el menú de configuración y las comunicaciones con la interfaz de configuración, monitoreo y visualización. Se evaluaron los puntos a favor y en contra de cada una de ellas y se seleccionó una para su implementación.

Los requerimientos que deben satisfacer tales alternativas, de acuerdo a las funciones a ejecutar son:

- Velocidad de procesamiento alta, para realizar el disparo de cada SCR en el instante exacto que se requiera.
- Capacidad de almacenamiento de programa alta para soportar el código o los circuitos digitales que permiten la implementación de las funciones descritas.
- Periféricos integrados que permitan integrar las funciones descritas en un mismo dispositivo.

- Capacidad de interacción con dispositivos periféricos externos como teclados y pantallas.
- Capacidad de manejar señales analógicas.
- Capacidad de atender diferentes eventos externos e internos que se produzcan en el sistema.
- Precisión y exactitud para el conteo de tiempos.
- Alta capacidad de procesamiento para ejecutar operaciones aritméticas con una buena velocidad y sin utilizar demasiados recursos.
- Facilidad de programación; es decir que tengan, o al menos que sea fácil, conseguir los recursos para programar el dispositivo.
- Facilidad de verificación y simulación de los desarrollos realizados. Se refiere a la existencia y facilidad de conseguir software adicional que permite la simulación del sistema de forma tanto macro (sistema interactuando con el medio) como micro (ejecución de instrucciones paso por paso).
- Facilidad de implementación en un circuito.
- Costo.

Y las alternativas de implementación planteadas para satisfacer los requerimientos anteriores son:

- FPGA.
 - FLEX 10K de Altera.
- Microcontrolador.
 - Microchip PIC18F458.
 - Motorola MC68HC908GP32

Desde el punto de vista de velocidad de procesamiento, potencia de cálculo y capacidad de almacenamiento de programa la FPGA de Altera cumple satisfactoriamente con estos requisitos, ya que al ser un sistema conformado exclusivamente por circuitos digitales que trabajan de manera concurrente y que entregan una respuesta frente a un solo ciclo de reloj, se alcanzan velocidades de procesamiento mucho mayores a las de un procesador cualquiera; además la FLEX 10K incluye unidades multiplicadores que permiten realizar operaciones aritméticas con gran facilidad, gran integración de compuertas para construir cualquier circuito y adicionalmente, presentan bloques de memoria RAM y flip-flops para almacenamiento de datos.

Pero para requerimientos como la capacidad de manejo de señales análogas, para ejecutar la función de comunicación, el manejo de eventos externos e internos y la facilidad de implementación en un circuito es una alternativa que

se queda corta porque es completamente digital y no tiene circuitos Conversores Analógicos-Digitales integrados, no tiene módulo de comunicaciones alguno y por ende, es necesario construir dicho módulo desde cero para implementar la función de comunicación, implementando la transmisión y recepción de datos desde el nivel físico (bit a bit) y no a nivel de enlace de datos (bytes) como en otros dispositivos; no hay manejo de interrupciones, la implementación de estos dispositivos en un circuito es por lo general a nivel de montaje superficial y no se dispone de software para simulaciones a nivel macro, es decir, del sistema completo interactuando con sus periféricos. Por tales razones, *la alternativa de desarrollo sobre la FPGA se descartó de primera.*

Las otras dos alternativas, en cambio, si cumplen satisfactoriamente con todas las especificaciones mencionadas, por lo tanto, es necesario hacer un análisis más detallado para decidirse por una u otra.

La siguiente tabla ilustra dicho análisis, en el cual se le asigna un puntaje entre 0.1 y 0.5 a cada requerimiento de acuerdo a la importancia que tiene y otro puntaje entre 1 y 5 de acuerdo a la forma como se satisface por el microcontrolador. El puntaje que se da al microcontrolador se multiplica por la importancia que tiene el requerimiento y se obtiene un puntaje ponderado por cada uno; al final se suman esos ponderados y se obtiene el puntaje total de cada alternativa de solución.

En la escala de importancia, el valor 0.5 corresponde al requerimiento que tiene mayor importancia y el valor 0.1 al de menor; y en la escala de satisfacción del requerimiento por cada microcontrolador, el valor 5 corresponde al microcontrolador que mejor lo hace y el valor 1 corresponde al peor.

Tabla 3.1. Análisis realizado para determinar la alternativa de solución a implementar.

	Puntaje Importancia	PIC18F458		MC68HC908GP32	
Velocidad	0,5	4	2	4	2
Memoria de Programa	0,4	4	1,6	4	1,6
Periféricos Integrados	0,5	5	2,5	5	2,5
Interacción con dispositivos externos	0,4	5	2	5	2
Manejo de Señales Análogas	0,2	3	0,6	3	0,6
Interrupciones	0,5	4	2	4	2
Precisión en conteo de tiempos	0,5	4	2	4	2
Capacidad de Procesamiento	0,5	5	2,5	4	2
Programación	0,4	4	1,6	3	1,2
Simulación	0,4	5	2	3	1,2
Implementación	0,5	5	2,5	3	2,5
Costo	0,4	4	1,6	4	1,6
PUNTAJE TOTAL		22,9		21,2	

Como puede observarse en la tabla, el microcontrolador PIC18F458 ofrece mayores ventajas en cuanto a:

- Capacidad de procesamiento, ya que es un microcontrolador que de 16 bits, es decir, su CPU tiene un bus interno de datos de 16 bits y por ende, realiza todas las operaciones en registros de dicho tamaño, razón por la cual, realiza cálculos más exigentes a mayor velocidad y utilizando menos recursos; lo anterior implica un set de instrucciones mucho más amplio que permite operaciones aritméticas como multiplicaciones y divisiones en lenguaje ensamblador; mientras que el microcontrolador MC68HC908GP32 es solo de 8 bits.
- Facilidad de programación, debido a que para los microcontroladores de Microchip se tiene el software que provee la compañía de manera gratuita, MpLab, que soporta diferentes compiladores en ensamblador y en lenguajes de alto nivel como C o Basic, mientras que para los microcontroladores de Motorola se cuenta con el software Code Warrior cuya licencia profesional debe

ser adquirida. Además, existen en el mercado numerosos dispositivos programadores de todos los precios y aplicaciones para los microcontroladores de Microchip, mientras que para los microcontroladores de Motorola se necesitan dispositivos programadores más complejos y difíciles de conseguir.

- Simulación y verificación de resultados, porque el mismo software de programación de Microchip, MpLab, sirve para simulación paso por paso y en otros software de simulación a nivel macro, como Proteus, se cuenta con las librerías para casi todos los microcontroladores PIC.

Por lo tanto, se decidió implementar como dispositivo de control del sistema el Microcontrolador **PIC18F458** de Microchip.

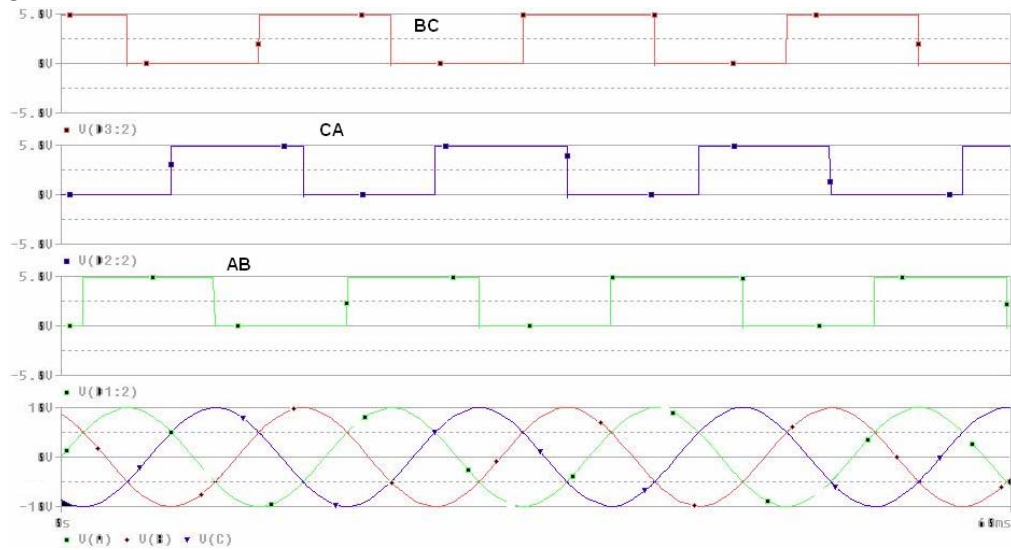
3.2. ETAPA HARDWARE

En esta etapa se realizó el diseño, las pruebas y la implementación física de los siguientes circuitos:

- Detector de cruces entre fases.
- Detector de cruces por cero.
- Circuito de control del sistema.
- Driver's para el disparo de los SCR's.
- Plataforma de conexión para el Rectificador Controlado.

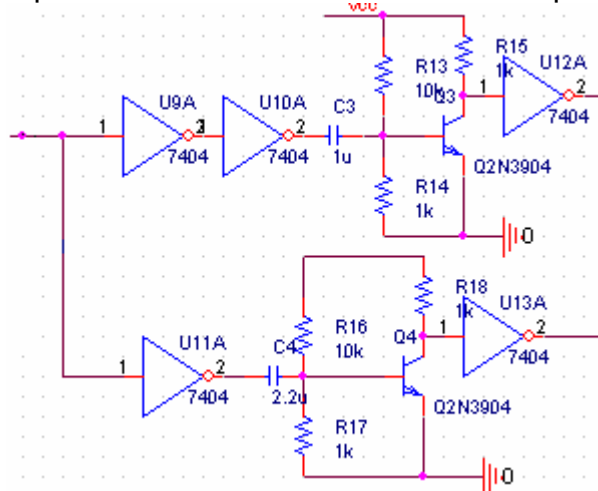
3.2.1. Detector de cruces entre fases. Este circuito es el sensor utilizado para detectar los cruces entre las fases y comunicar ese evento al circuito de control mediante una señal, para que éste pueda controlar las topologías trifásicas (3 pulsos y 6 pulsos); tiene como función principal generar un tren de pulsos sincronizado con los instantes exactos donde se cruzan las fases de la línea de alimentación para indicarle al control del sistema el instante a partir del cual debe iniciar el conteo del tiempo correspondiente al ángulo de disparo de los SCR's. Además, debe indicar qué fases que se están cruzando en cada instante para permitir al sistema de control decidir cuál SCR (o cuales) disparar. Funciona de la siguiente manera: Primero, se realiza una comparación continua entre las tres fases agrupadas en parejas para conocer cuáles se cruzan, cuál va aumentando su amplitud y cuál va disminuyendo, mediante un comparador LM339. De este proceso, se obtienen tres señales cuadradas con una frecuencia de 60Hz, desfasadas 120° entre sí; una que representa el cruce entre las fases "a-b", otra que representa el cruce entre las fases "c-a" y una última que representa los cruces entre las fases "b-c". Cabe anotar que para obtener las señales entre 0 y 5V a la salida del comparador, es necesario conectar una resistencia a pull-up en la salida del comparador (ya que este es con colector abierto) y un diodo 1N4148 en serie con dicha salida, para cortar la parte negativa que corresponde al nivel cero para este dispositivo (Cuando la fase que entra por el terminal no inversor es menor a la que entra por el terminal inversor).

Figura 3.1. Señales que se obtienen después de la comparación entre las fases.



Luego, se toma cada una de estas señales y se acondicionan mediante dos circuitos de transistores conectados en paralelo, en configuración de emisor común y trabajando en zona activa, para transformar cada onda cuadrada en una señal que representa los flancos de subida y de bajada con pequeños pulsos de corta duración (aprox. 1ms de ancho por cada pulso), donde cada flanco de subida de la señal pulsante, coincide exactamente con un flanco de subida o de bajada del tren de pulsos original; esto con el objetivo de generar señales que puedan ser detectadas por el sistema de control, ya que éste no detecta flancos de bajada.

Figura 3.2. Circuito que convierte una onda cuadrada en pulsos de subida.



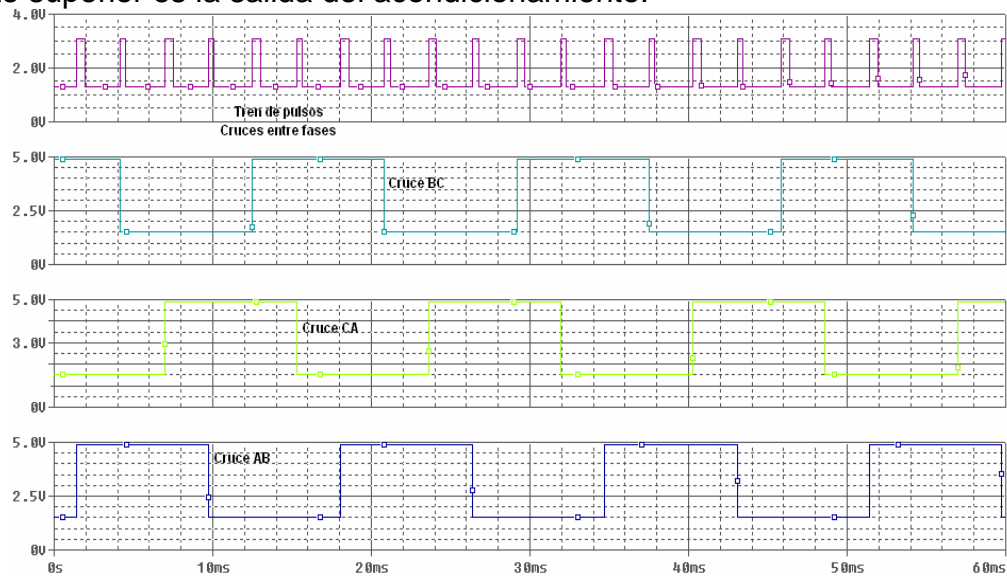
El condensador a la entrada de la base del transistor se utiliza para eliminar cualquier nivel de DC que pueda traer la señal y para redondear el flanco de subida de la misma, el cual es el que se amplifica mediante los transistores y se acomoda mediante las compuertas de la salida para que sea TTL nuevamente. El ancho del pulso depende de la capacitancia del condensador; mientras más grande sea el valor de dicha capacitancia, más ancho es el

pulso. Cabe anotar que de las tres señales originales de onda cuadrada, se obtienen seis de pulsos que representan únicamente los flancos de subida (en tres de las señales) y de bajada (en las otras tres), debido a que por cada señal original se generan dos nuevas.

Por lo tanto, es necesario acomodar dichas señales en una sola para transmitirla al sistema de control; esto se hace mediante un arreglo de compuertas OR para que cada que aparezca un 1 lógico en la entrada de una compuerta, éste aparezca en la salida.

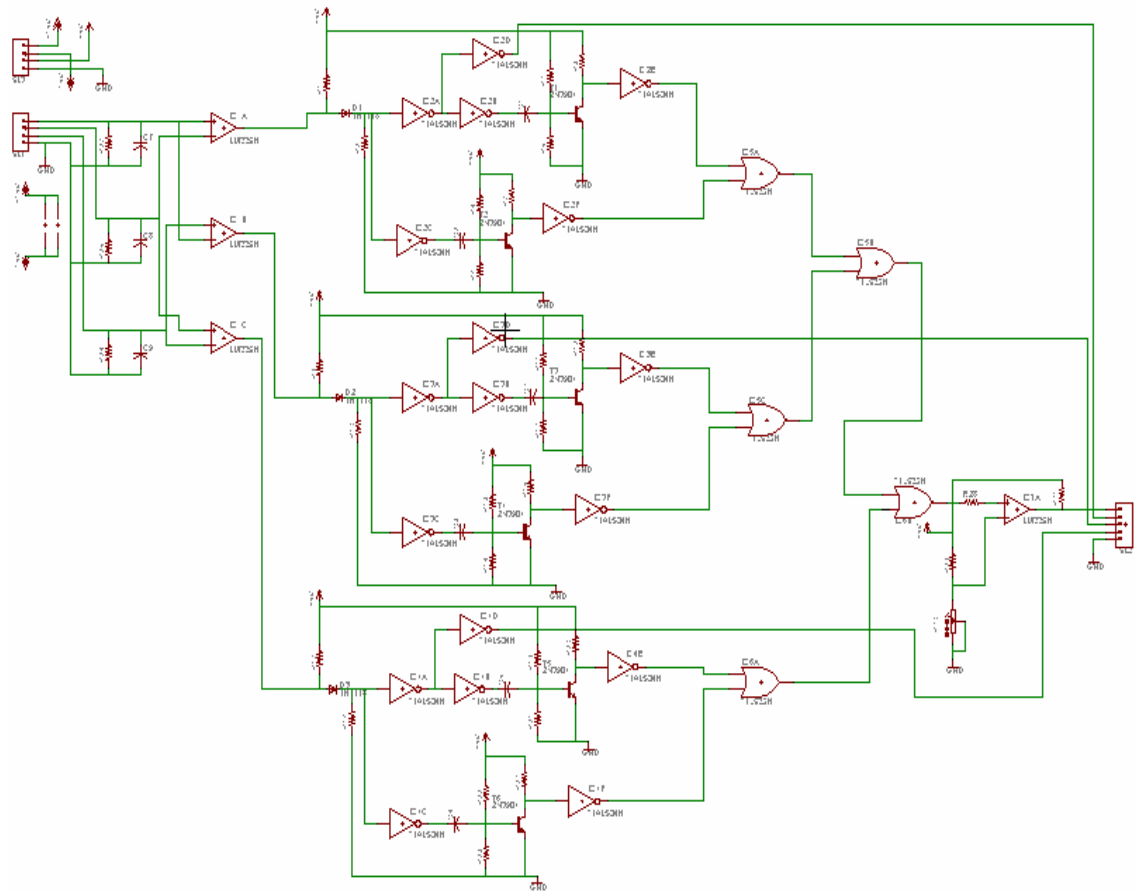
Las señales de salida de dicho circuito pueden verse en la siguiente figura:

Figura 3.3. Señales de salida del circuito detector de cruces. La señal de la parte superior es la salida del acondicionamiento.



A continuación puede verse el esquemático completo para generar las señales mostradas:

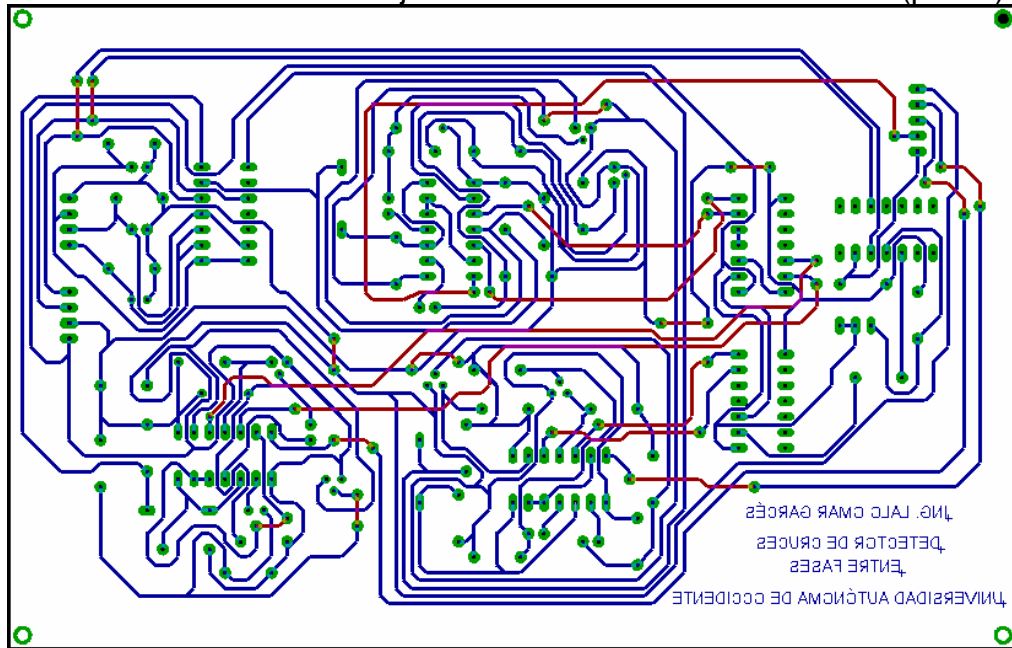
Figura 3.4. Circuito esquemático detector de cruces entre fases completo.



Para la implementación física de este circuito se optó por diseñar una tarjeta en fibra de vidrio con pistas y conexiones por encima y por debajo (doble faz), debido a la gran cantidad de componentes que contiene y que además se encuentran interconectados entre sí. En tales casos, la conexión de unos componentes con otros se hace muy difícil mediante pistas que solo se encuentran por la parte de debajo de la tarjeta, como es lo habitual, sobre todo si hay componentes que se encuentran alejados de otros y tienen una conexión común; esto debido a que la pista que los uniría tendría que recorrer una trayectoria larga, y por lo general, dicha trayectoria ya es ocupada por otras pistas.

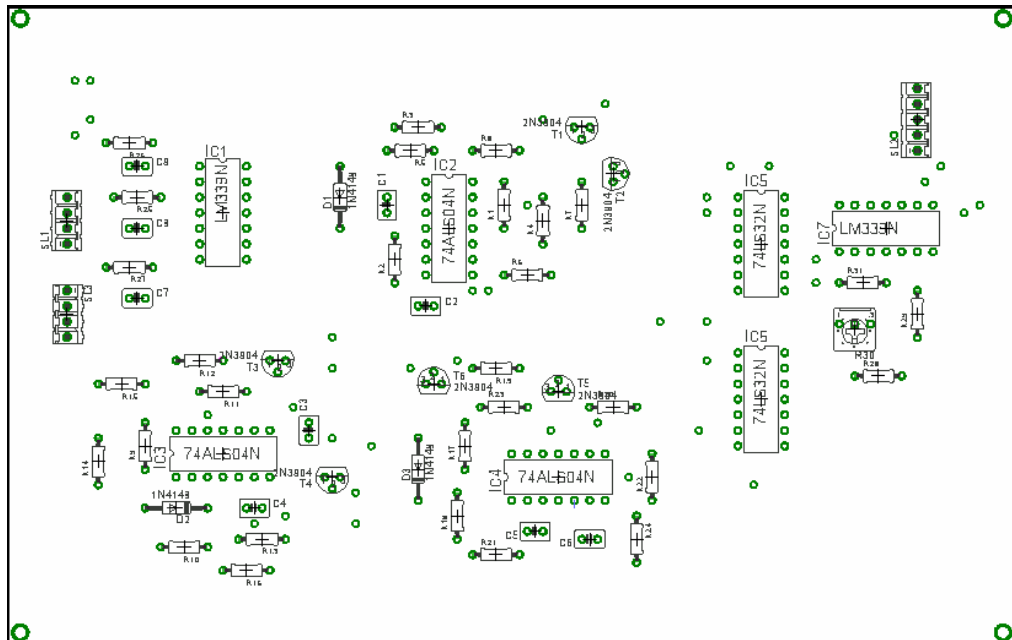
Las uniones entre las pistas de ambos lados de la tarjeta se realizan a través de pequeños puentes que traspasan la misma de un lado a otro y no mediante los pines de los componentes y conectores, los cuales se encuentran en la parte superior; esto debido a la dificultad de conseguir componentes y conectores que puedan soldarse por la parte de arriba de la tarjeta o que sean para montaje superficial. Con base en lo anterior, el diseño final del circuito detector de cruces es el siguiente:

Figura 3.5. Diseño final de la tarjeta detector de cruces entre fases (pistas).



Las líneas azules corresponden a las pistas que van por la parte de debajo de la tarjeta y las líneas rojas corresponden a las pistas de la parte de arriba. Los agujeros o “donas” donde se unen una línea roja y otra azul son los puentes que atraviesan la tarjeta y unen las pistas superiores con las inferiores.

Figura 3.6. Ubicación de componentes en la tarjeta diseñada para el detector de cruces entre fases.



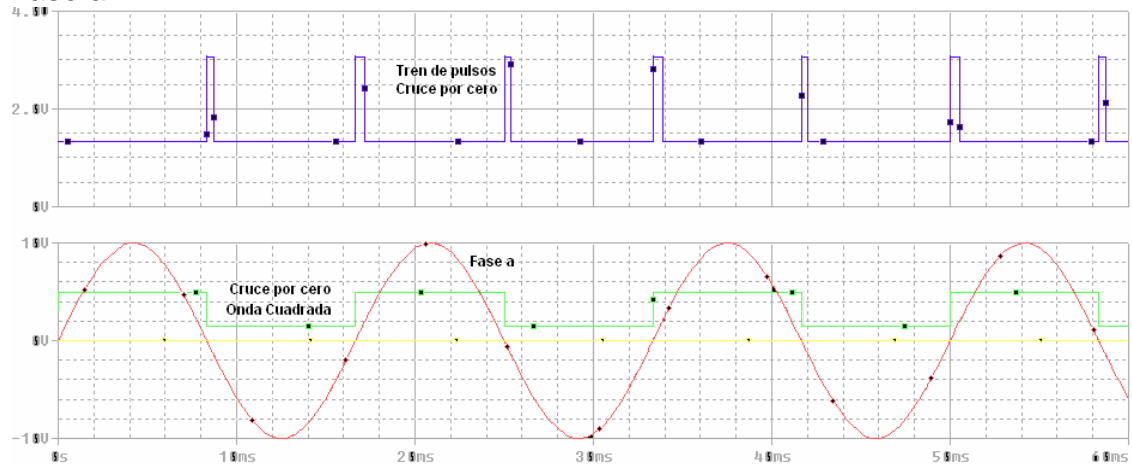
3.2.2. Detector de cruces por cero. Este circuito es el sensor que se utiliza para manejar el control de las topologías monofásicas (semi-controlado y totalmente controlado). Cuando en el sistema de control se selecciona alguna

de estas topologías y además en la plataforma de conexión se realiza el cableado correspondiente a la topología seleccionada, el sensor que debe conectarse al sistema de control debe ser este circuito. Su función principal es detectar los instantes donde la “fase a” cruza por cero (la “fase a” está definida por defecto y no puede modificarse) y generar un tren de pulsos indicando dichos instantes. Esto para indicar al sistema de control cuándo debe iniciar el conteo del tiempo correspondiente al ángulo de disparo de los SCR's.

Su funcionamiento es el siguiente: Primero, se realiza una comparación continua entre la “fase a” y el nivel cero (tierra del circuito) mediante un LM339, con el objetivo de verificar cuándo la señal está por encima o por debajo y cuándo se realiza el cruce. Además del comparador, debe conectarse una resistencia a pull-up en la salida del mismo para limitar el nivel 1 lógico a 5V y un diodo 1N4148 para recortar el nivel 0 lógico a 0V.

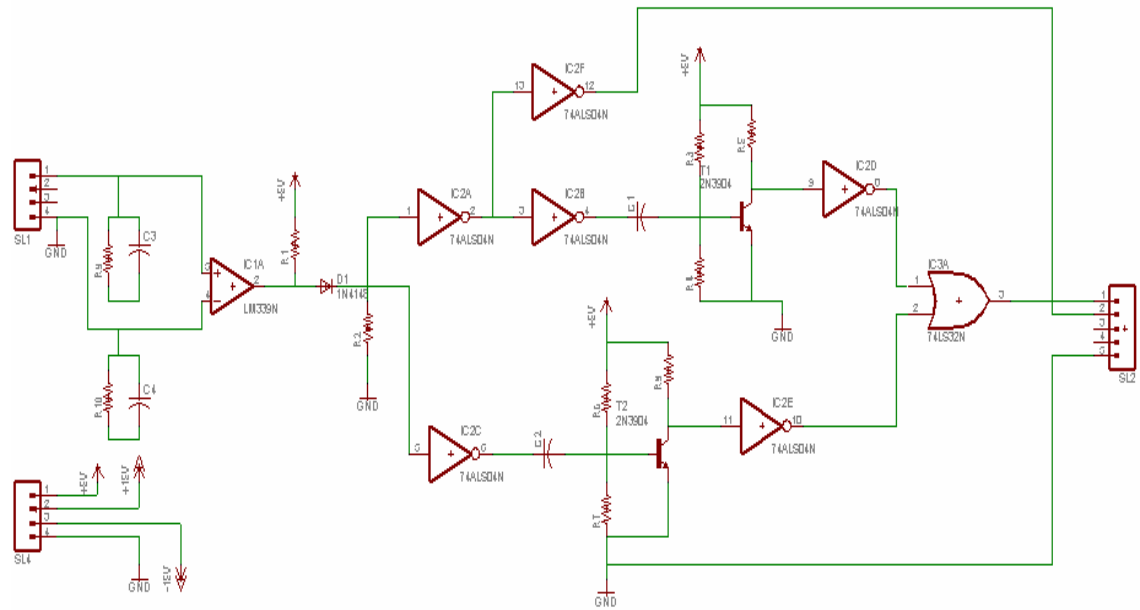
De este procedimiento se obtiene una onda cuadrada a la misma frecuencia de la línea de alimentación (60Hz) y sincronizada con ésta, donde cada transición de subida y de bajada representa un cruce. La transición de subida representa el cruce cuando la señal pasa de negativo a positivo y la transición o flanco de bajada cuando pasa de positivo a negativo. Y como el sistema de control no reconoce flancos de bajada, es necesario acondicionar dicha señal cuadrada en una que represente las transiciones con pulsos de corta duración, similar a la obtenida en el circuito “detector de cruces entre fases”. Para esto, se utiliza el mismo esquema con transistores del circuito ya mencionado y al final, mediante una compuerta OR se incrustan las dos señales que se obtienen en una sola para ser transmitida.

Figura 3.7. Señal de salida del circuito que representa los cruces por cero de la “fase a”.



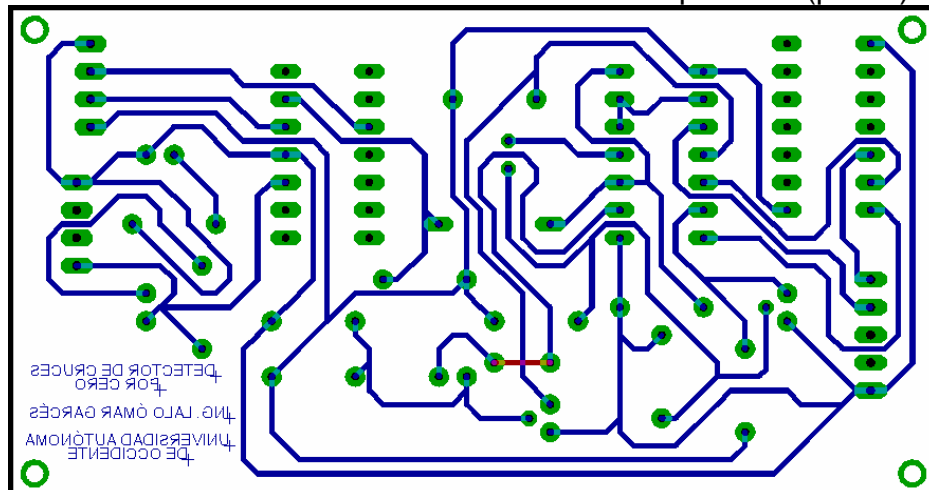
El circuito esquemático es el siguiente:

Figura 3.8. Circuito esquemático completo del detector de cruces por cero.



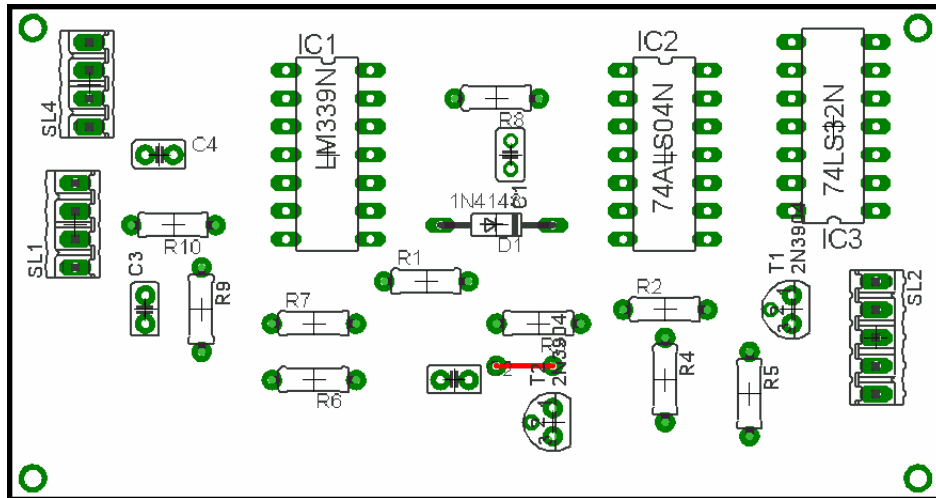
La implementación física para este circuito se realizó en una tarjeta de una sola faz, en baquelita, la cual contiene los componentes en la parte de arriba y las pistas en la parte de abajo. Las entradas del circuito son: una muestra de la "fase a" que se obtiene de un transformador reductor de voltaje y las fuentes de alimentación de +15V, -15V y +5V para los circuitos integrados utilizados. Como salida se tiene únicamente la señal de sincronización con los cruces. Se utiliza un conector ZCN de 4 pines para la señal de entrada que viene del transformador y un conector ZCN de 5 pines para la salida, porque esta tarjeta debe tener la misma forma de conexión que la anterior, ya que se utiliza una u otra dependiendo de la topología conectada.

Figura 3.9. Diseño final del circuito detector de cruces por cero (pistas).



Las líneas azules representan las pistas del circuito y la línea roja que se ve en la parte inferior representa un puente que debe hacerse con cable telefónico para conectar dos pistas.

Figura 3.10. Ubicación de componentes en la tarjeta detector de cruces por cero.



3.2.3. Circuito de control. Este circuito es el responsable del funcionamiento del sistema porque contiene los elementos que permiten controlar los disparos de los SCR's para cada topología, además de permitir el funcionamiento normal del rectificador controlado, la interacción con el usuario, la configuración del sistema y la comunicación con la interfaz gráfica de visualización, configuración y monitoreo. De acuerdo a las funciones descritas, este sistema se encuentra subdividido en 4 módulos:

- Módulo de Control o CPU.
- Módulo de Configuración.
- Módulo de Visualización.
- Módulo de Comunicación.

La CPU o el Módulo de Control es el encargado de procesar las señales generadas por los sensores y de realizar los disparos de los SCR's dependiendo del estado de dichas señales, de la topología seleccionada y del ángulo de disparo deseado por el usuario. En otras palabras, es el que ejecuta todas las rutinas que permiten el control del circuito rectificador mediante los disparos secuenciales de los rectificadores, la posibilidad de configurar el sistema, de ejecutar un control diferente para cada topología, de variar el ángulo de disparo, entre otros. Como ya se mencionó se utilizó como CPU el microcontrolador de 16 bits PIC18F458 de Microchip.

El Módulo de Configuración es el encargado de permitir al usuario interactuar con el sistema, permitiéndole acceder a éste y seleccionar la topología que desee poner a funcionar, el ángulo de disparo de los SCR's y el arranque y el paro del mismo. Dicho módulo está conformado por un teclado matricial conectado a la parte baja del puerto C y a la parte alta del puerto B del microcontrolador, el cual se utiliza para enviar órdenes al sistema de manera local; y también por la interfaz gráfica de visualización, configuración y

monitoreo que se encarga de enviar órdenes al sistema de manera remota y que se conecta al microcontrolador mediante comunicación serial RS-232.

El Módulo de Visualización se encarga de mostrar al usuario todas las opciones de configuración que dispone el sistema y la manera como ésta se va realizando paso por paso, con el objetivo de hacerla más fácil y sencilla. En cierto modo, permite también la interacción del usuario con el sistema porque le da información al usuario acerca de lo que puede hacer utilizando el módulo de configuración y le permite verificar si las opciones que escogió son las que realmente desea (o debe escoger).

De manera local, se tiene una pantalla LCD que muestra las opciones, el estado de la configuración y el estado del sistema, es decir, si éste se encuentra en línea o en “stand-by”; dicha pantalla LCD se encuentra conectada a dos de los puertos del microcontrolador de la siguiente manera: los pines donde se pone la palabra de datos o control al puerto D, y los pines de control al puerto E (que es solo de 3 pines). Y de manera remota se tiene la interfaz de visualización, configuración y monitoreo, la cual, permite también visualizar la configuración, el estado del sistema y adicionalmente, la salida del circuito rectificador.

Y por último, se tiene *el Módulo de Comunicación* que tiene como función comunicar el microcontrolador (o CPU del sistema) con la interfaz de visualización, configuración y monitoreo mediante un enlace punto a punto RS-232, para permitir configurar el sistema desde dicha interfaz, ya sea en línea o en “stand-by”, visualizar el estado del mismo y monitorearlo en línea.

Físicamente, este módulo está conformado por: La USART (Unidad de Transmisión – Recepción Síncrona - Asíncrona) del microcontrolador, la cual contiene dos pines para establecer la comunicación, uno de transmisión TX y otro de recepción RX. Un circuito integrado conversor de niveles TTL a RS-232 de referencia MAX-232 y los componentes que requiere su configuración, que se encarga de modificar la información de lógica TTL (nivel 1 lógico, 5V – nivel 0 lógico, 0V) que es la lógica de trabajo de la electrónica digital a la lógica definida por el estándar de comunicaciones punto a punto RS-232C ó V.24 (nivel1 lógico, -10V hasta -15V – nivel 0 lógico, +10V hasta +15V), que es la lógica a la cual funciona el puerto serial COM1 o puerto de comunicaciones de cualquier PC.

Un conector ZCN de 3 pines para enviar al PC las señales TX, RX y la tierra del circuito, y finalmente, un cable de conexión que tiene por un lado terminación ZCN (para conectarse a la tarjeta) y por el otro, un conector serial DB9 para conectarse al PC. Dicho cable se encuentra puenteado internamente entre los pines 6-4 y 7-8, debido a que éstos corresponden a señales de “handshaking” o protocolo por hardware, de las cuales no dispone la USART del microcontrolador. Las señales de “handshaking” de la comunicación serial RS232 son:

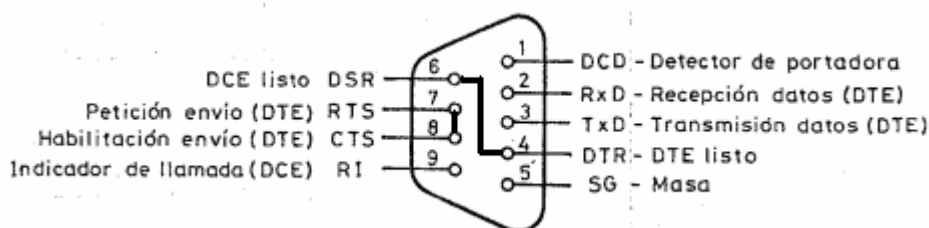
Tabla 3.2. Señales utilizadas en la comunicación RS232 y su distribución de pines en los conectores DB9 y DB25.

SEÑAL	N.º PATILLA			FUNCIÓN
	DTE		DCE	
	DB-25	DB-9		
FG	1	—	1	Pantalla de protección de ruidos EMI
TxD	2	3	2	Datos DTE (transmite) → DCE (recibe)
RxD	3	2	3	Datos DTE (recibe) ← DCE (transmite)
RTS	4	7	4	DTE (petición de envío) → DCE
CTS	5	8	5	DTE (habilitación de transmisor) ← DCE
DSR	6	6	6	Modem listo DTE ← DCE
DTR	20	4	20	Terminal listo DTE → DCE
DCD	8	1	8	Detección de portadora modem DTE ← DCE
RI	22	9	22	Detección de llamada telefónica DTE ← DCE
SG	7	5	7	Cero de señal, masa.

Fuente: Ballcels; Romeral. Conceptos de comunicaciones digitales. 2 ed. Madrid: Alfaomega, 2002. p. 286.

El conector DB9 por lo tanto, debe puentearse de la siguiente manera:

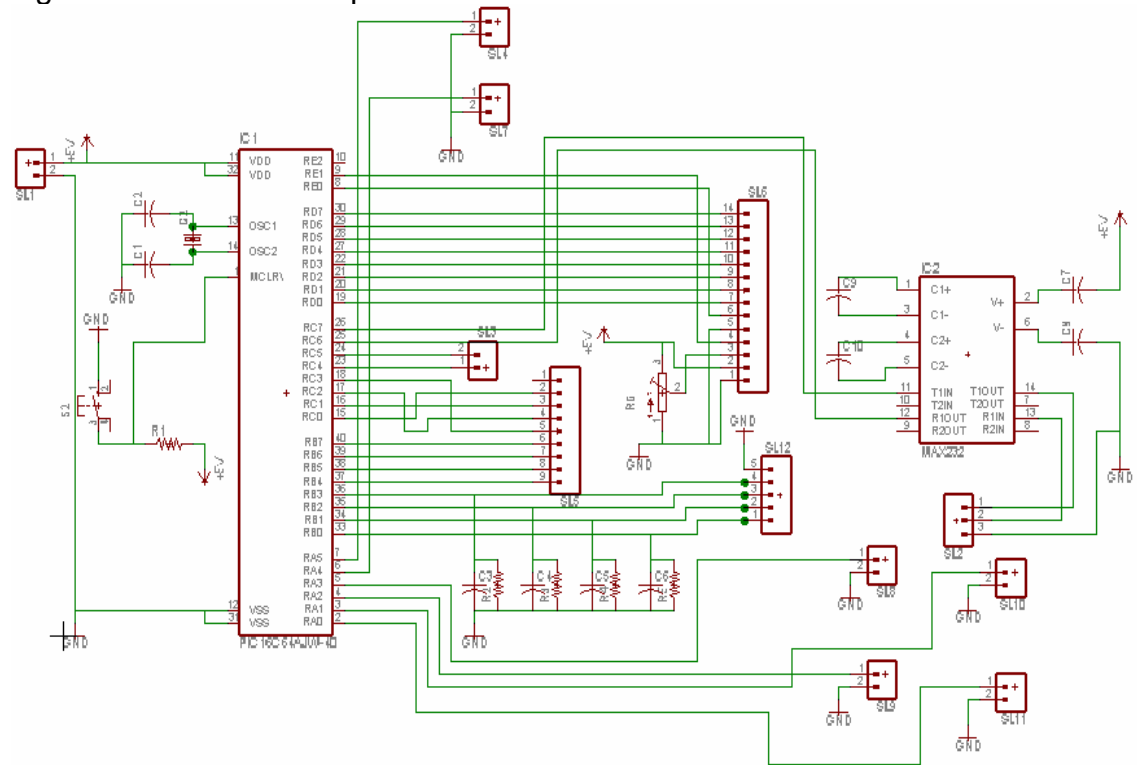
Figura 3.11. Conector DB9 adaptado para una comunicación RS232 sin señales de “handshaking” por hardware.



Fuente: Ballcels; Romeral. Conceptos de comunicaciones digitales. 2 ed. Madrid, Alfaomega, 2002. p 285.

A continuación puede verse el esquemático completo del circuito de control:

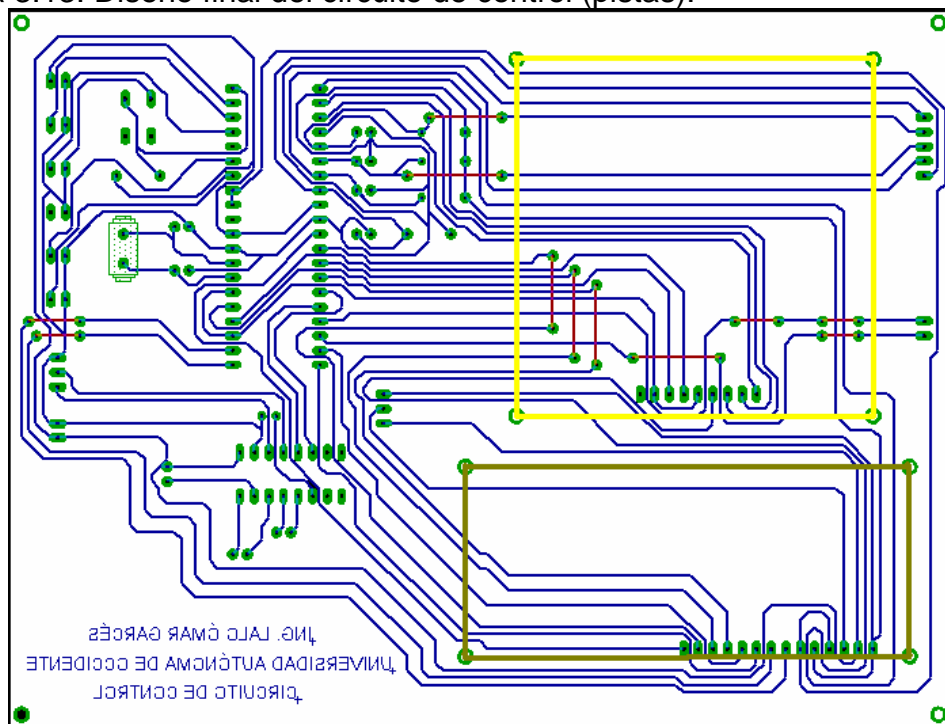
Figura 3.12. Circuito esquemático de control.



El conector ZCN de 14 pines corresponde al conector de la pantalla LCD y el de 9 pines al del teclado matricial; los conectores ZCN de dos pines conectados al puerto A son los que envían los pulsos de disparo a los circuitos driver's de los SCR's, el conector ZCN de 5 pines conectado a la parte baja del puerto B son las señales de entrada que vienen desde el circuito sensor utilizado y el conector ZCN de 3 pines conectado a las salidas del MAX-232 es el que se conecta la puerto serial del PC mediante el cable ya mencionado. Adicionalmente, se tiene un conector ZCN de dos pines conectado a los pines 4 y 5 del puerto C, los cuales en el momento no se están utilizando, con el objetivo de disponer de la posibilidad de utilización de dichos pines para futuras mejoras del sistema o pruebas de algún cambio en la implementación.

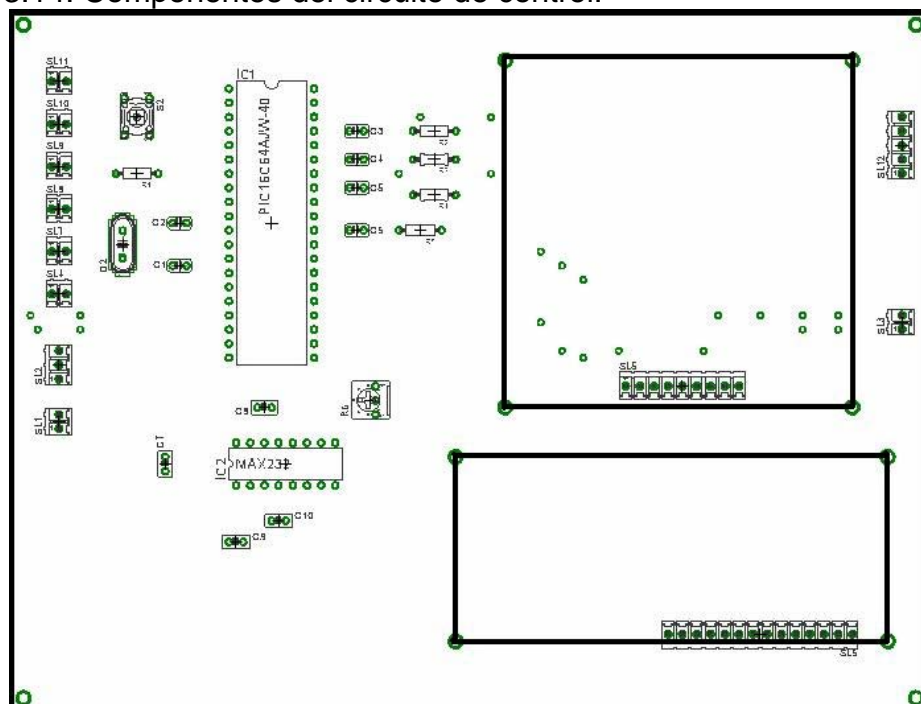
La implementación física del circuito se realizó en una tarjeta fabricada con baquelita, de una sola faz, la cual tiene las pistas, conexiones y puntos de soldadura por la parte inferior y los componentes ubicados en la parte superior. Cabe anotar que, debido a la gran cantidad de pines que deben conectarse entre sí se optó por realizar algunos puentes con cable telefónico sobre la parte superior de la tarjeta, aunque la gran mayoría de ellos quedaron por debajo de la zona donde se ubicará el teclado matricial y por lo tanto no son visibles.

Figura 3.13. Diseño final del circuito de control (pistas).



El cuadrado amarillo corresponde a la zona donde se ubicará el teclado matricial y el rectángulo verde militar corresponde a la zona donde se ubicará la pantalla LCD. Las líneas de color azul son las pistas que van por la parte inferior de la tarjeta y las líneas de color rojo son los puentes que van por la parte superior y que como puede comprobarse, se encuentran en su mayoría debajo del teclado matricial.

Figura 3.14. Componentes del circuito de control.



3.2.4. Circuitos Driver's para el disparo de los SCR's. Estas tarjetas son las encargadas de acondicionar las señales de salida del circuito de control para disparar los SCR's del Rectificador Controlado. En otras palabras, su función es darle a dichas señales el nivel de tensión, la ganancia de corriente, la forma de onda y el tiempo de duración necesarios para activar cualquiera de estos dispositivos.

En la práctica, un SCR puede activarse de varias maneras:

- Excediendo el voltaje de ruptura que puede soportar el dispositivo en polarización directa aplicando una tensión positiva muy alta entre ánodo y cátodo, con el objetivo de aumentar el flujo de las corrientes de fuga que lo atraviesan a medida que se aumenta la tensión. No es una forma muy usual porque se opera al dispositivo en condiciones para las cuales él no ha sido diseñado, por lo tanto, es muy susceptible a producir en el mismo daños y averías.
- Activación térmica, la cual se produce porque la temperatura del tiristor es alta y por ende, se genera un aumento en los pares electrón hueco de las uniones PN que aumentan las corrientes de fuga. Trata de evitarse porque se opera al tiristor en condiciones de temperatura para las cuales él no ha sido diseñado y se corre el riesgo de dañarlo con niveles de tensión o intensidades de corriente que el dispositivo en condiciones normales soporta, pero que al no encontrarse dentro de ellas no lo hace.
- Cuando la velocidad de incremento del voltaje que se aplica entre ánodo y cátodo $\left(\frac{dv}{dt}\right)$ es muy alta o es superior al valor máximo permitido por el dispositivo, debido a que se producen corrientes transitorias de carga de los condensadores internos muy altas. Si el valor pico de alguna de esas corrientes de carga es muy grande se puede fracturar el dispositivo, por lo tanto, es necesario proteger los SCR's ante tales $\frac{dv}{dt}$ altos.
- Y por último, polarizando al dispositivo de forma directa aplicando una tensión positiva entre ánodo y cátodo superior a 1V e inferior al voltaje de ruptura, con el objetivo de producir una corriente con una intensidad superior a un valor nominal conocido como "corriente de enganche", la cual se refiere a la mínima corriente que el dispositivo necesita para entrar a conducir. Adicionalmente, se debe aplicar un pulso positivo de corriente en la terminal gate, con una intensidad superior al valor mínimo requerido, para indicar el instante exacto del inicio de la conducción. Además, dicho pulso de corriente debe tener normalmente un nivel de tensión superior a 12V e inferior a 20V, dependiendo del SCR utilizado.

Esta última es la forma convencional de poner a conducir un SCR porque no se exceden las condiciones normales de operación para las cuales el dispositivo ha sido diseñado, y por ende, es la forma utilizada por este circuito.

Y como existen diferentes formas de activar un SCR, también existen maneras para desactivarlo:

- *Conmutación Natural:* Ocurre cuando la corriente que circula a través del dispositivo (entre ánodo y cátodo) disminuye por sí misma hasta un valor inferior a la “corriente de sostenimiento”, que es el mínimo valor de corriente con el cual el dispositivo puede mantenerse activo; esto significa que no existe un circuito especial que provoque este comportamiento en la corriente, sino que éste se presenta por el comportamiento natural del circuito principal al cual está conectado el dispositivo. Este fenómeno ocurre en un instante de tiempo muy cercano al cruce por cero de la señal de tensión que polariza al dispositivo cuando el voltaje y la corriente no están desfasados, es decir, cuando la carga del circuito es resistiva; pero en circuitos donde se presenta desfase entre el voltaje y la corriente debido a que la carga es inductiva o capacitiva, puede producirse el caso que la onda de voltaje llegue a cero e inclusive de invertirse la polaridad entre ánodo y cátodo y que el dispositivo siga conduciendo, porque la corriente que circula a través de él no ha disminuido por debajo del valor de sostenimiento.
- *Conmutación forzada:* Ocurre cuando la corriente que circula por el dispositivo no puede llegar a cero por sí misma y necesita de un circuito especial que la haga disminuir su valor, así sea por un instante muy pequeño, produciendo un pulso de corriente invertido. Tales circuitos donde debe aplicarse la técnica de conmutación forzada son aquellos cuya entrada de tensión es DC y por ende, su corriente también lo es. Los circuitos de conmutación forzada están formados, generalmente, por un condensador, una o dos inductancias, diodos y otros tiristores auxiliares.
- Existe una tercera forma, que consiste en producir un corto entre las terminales ánodo y cátodo mientras el SCR se encuentra conduciendo, con el objetivo de obligar a la corriente que normalmente circula a través de el dispositivo, a circular por el corto y no a través del mismo y así, conseguir que dicha corriente llegue a cero (aunque físicamente no ocurre). Lo anterior se realiza cerrando un camino entre dichos terminales al presionar un pulsador. Se utiliza el mismo principio de la conmutación forzada, pero de una manera poco segura; por tal motivo, no es muy utilizada en la práctica, sobre todo en circuitos que manejan grandes corrientes, potencias y altos niveles de tensión.

Particularmente, este circuito toma una señal cuadrada producida por el microcontrolador para indicar el instante exacto donde debe iniciar a conducir un SCR y la convierte en un tren de pulsos de 2KHz de frecuencia, mediante una AND lógica que se realiza entre la señal original y una señal moduladora producida por un LM555 en configuración astable. Luego, se realiza un aislamiento galvánico mediante un transformador de pulsos para aislar la tierra del circuito de control con la tierra del circuito Rectificador y finalmente, se

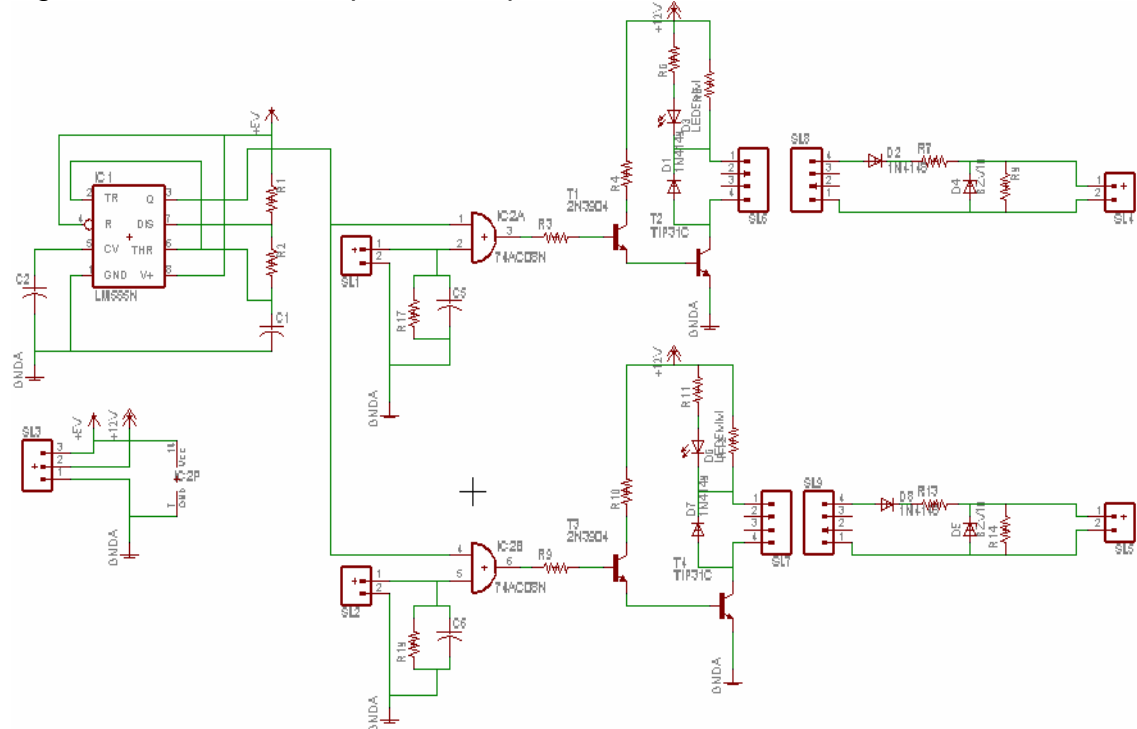
adicionan resistencias y diodos para mejorar las condiciones de la entrada a conducción del dispositivo.

Cabe anotar que no se puede conectar directamente la salida de la compuerta AND con el transformador de pulsos porque la compuerta es un dispositivo de alta impedancia de salida y por ende, puede suministrar muy poca corriente, mientras que el transformador es un dispositivo de baja impedancia de entrada y que demanda una intensidad de corriente considerable. Por tal motivo, se adiciona una etapa intermedia de amplificación de corriente y de acople de impedancias con dos transistores en configuración Darlington (emisor del primero conectado a la base del segundo), un 2N3904 de primero y un TIP31C al final. Adicionalmente, dicha etapa intermedia se alimenta con una tensión entre 12V y 15V para darle a la señal de salida final el nivel de voltaje necesario para producir el pulso de corriente en la gate.

La desactivación de los SCR' en cualquier topología de Rectificación Controlada se hace de forma natural, por lo tanto, este circuito no incluye ninguna red adicional para generar una conmutación forzada.

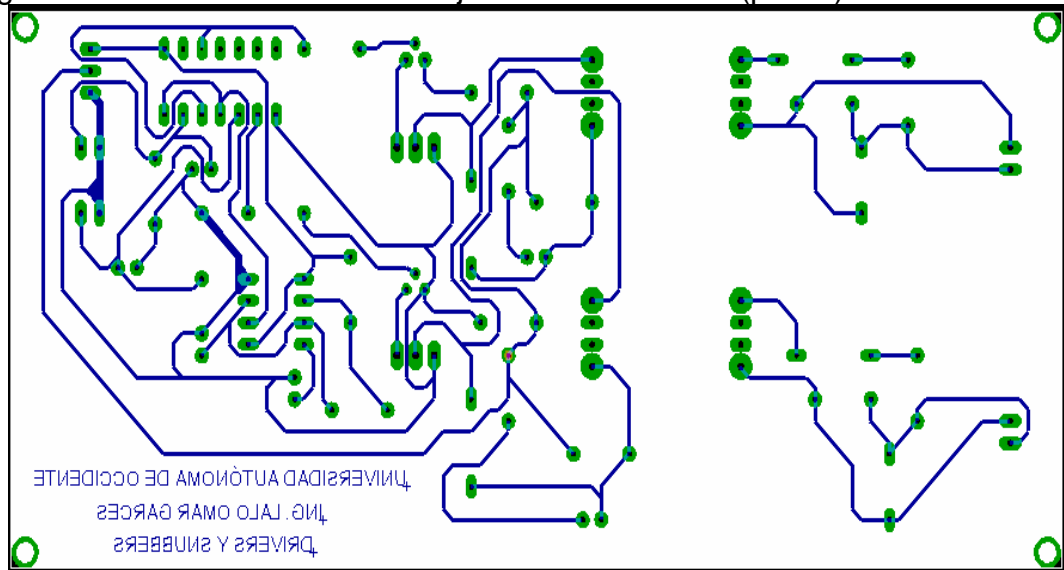
A continuación, puede visualizarse el esquema de diseño realizado para los driver's:

Figura 3.15. Circuito esquemático que contiene los driver's.



Como puede visualizarse en el esquemático, se incluyen dos driver's por cada tarjeta; por tal motivo, se construyeron tres tarjetas iguales para poder disparar los 6 SCR's que se tienen disponibles.

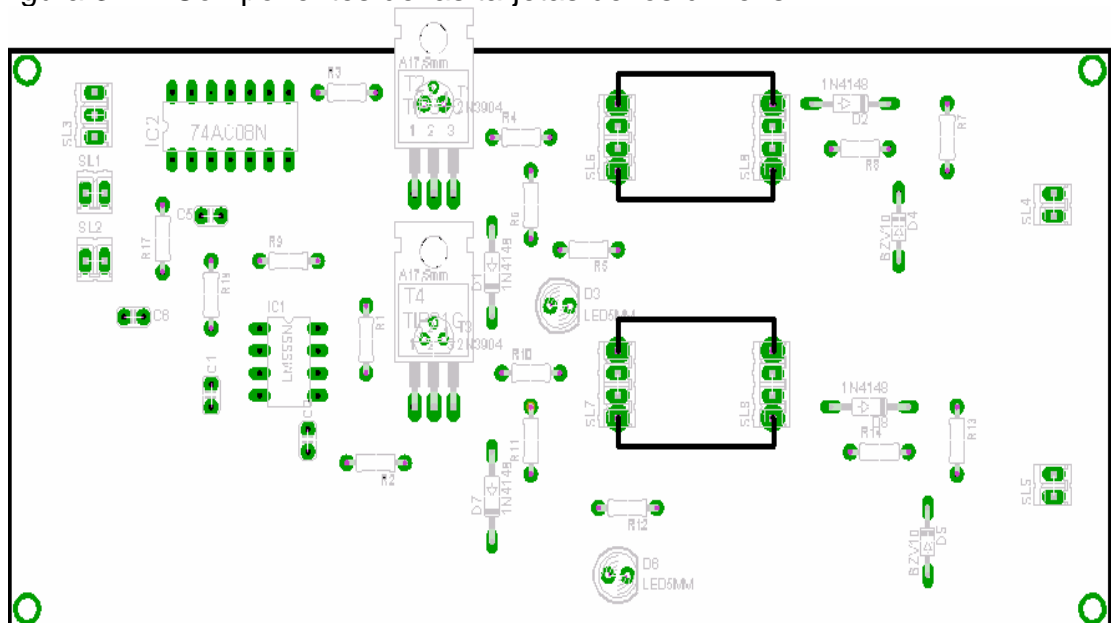
Figura 3.16. Diseño final de las tarjetas de los driver's (pistas).



La implementación física de las tarjetas se realizó en baquelita por una sola faz, es decir, con las pistas y los puntos de soldadura únicamente en la parte inferior y los componentes ubicados en la parte superior. Las donas más grandes se diseñaron para conectar los pines de los transformadores de pulsos, debido a que estos dispositivos tienen los pines más gruesos que los demás.

Cabe anotar que las donas pequeñas intermedias a las donas grandes no se utilizan, porque los transformadores de pulsos tienen únicamente 4 pines, ubicados de a 2 en cada lado, por lo tanto, no hay problema si una de las donas grandes queda cerca de alguna de las pequeñas.

Figura 3.17. Componentes de las tarjetas de los driver's.



3.2.5. Plataforma de conexión para el Rectificador Controlado. La implementación física para este circuito no se realizó sobre una tarjeta de circuito impreso como en los circuitos anteriores, si no que se realizó mediante una conexión discreta de los SCR's y diodos que componen cada topología. La justificación para realizar la implementación de esta forma alternativa consiste en que las conexiones entre los SCR's y diodos no son fijas, sino que el usuario las establece cada que necesita poner a funcionar una topología específica. Por lo tanto, realizar una tarjeta de circuito impreso sin pistas que conecten los componentes es poco práctico y reduce el espacio que se requiere para ubicar todas las tarjetas.

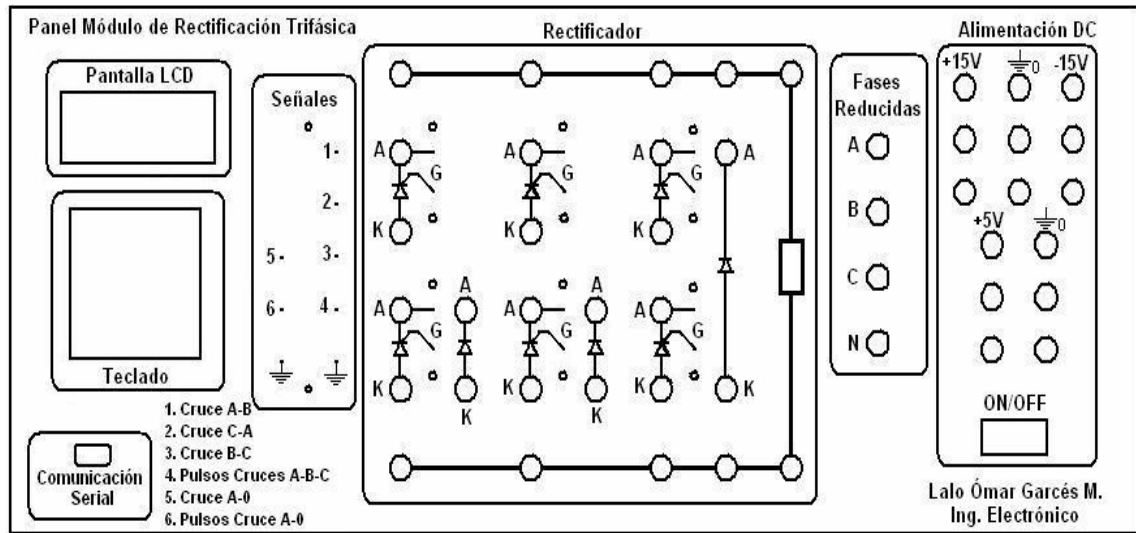
Por ejemplo, cuando se necesita conectar el circuito como Rectificador Semicontrolado se deben conectar 2 SCR's y dos diodos en forma de puente, donde los SCR's van en la parte de arriba conectados entre sí a través de sus cátodos, los diodos en la parte de abajo conectados entre sí por intermedio de sus ánodos y con la conexión entre los SRC's y los diodos de cada rama del puente por intermedio del ánodo del SCR y el cátodo del diodo; más un diodo adicional que va en paralelo al puente y que se utiliza como diodo de rueda libre. La fase y el neutro de la red de alimentación se conectan a los puntos comunes de cada rama del puente y la tensión de salida se obtiene entre la parte superior y la parte inferior del mismo. Si la topología a conectar, en cambio, es la de Rectificador Totalmente Controlado, se deben conectar 4 SCR's en forma de puente de la misma forma que se conecta el puente mixto en la topología anterior, sin la necesidad de utilizar diodo de rueda libre.

Si la conexión deseada es como Rectificador Trifásico de 3 pulsos, se deben conectar tres SCR's a través sus cátodos y cada una de las fases de la red de alimentación a cada uno de los ánodos; la carga se conecta entre el punto de unión de los tres SCR's y el punto neutro de la red de alimentación trifásica. O finalmente, si la topología deseada es la de Rectificador Trifásico de 6 Pulsos, se deben conectar 6 SCR's entre sí en forma de puente trifásico, el cual, consta de tres ramas de dos SCR's cada una conectadas en la parte superior por los cátodos y en la parte inferior por los ánodos; al interior de cada rama, la conexión es entre el cátodo del SCR de abajo y el ánodo del SCR de arriba. Cada fase de la red de alimentación se conecta al punto común de cada rama y la tensión de salida se obtiene entre las conexiones de ánodos y cátodos, es decir, entre la parte superior y la parte inferior del puente.

La plataforma sobre la cual el usuario realizará las conexiones deseadas es un panel construido en acrílico que contiene un conjunto de borneras conectadas internamente a los terminales ánodo y cátodo de los SCR's y diodos que pueden conectarse entre sí y dos líneas comunes desde las cuales se debe obtener la tensión de salida. Adicionalmente, el panel contiene borneras para ingresar las señales de las fases de la red de alimentación trifásica después de reducirles el nivel de tensión mediante transformadores, las cuales se utilizan en los circuitos sensores detectores de cruces, y otras más para suministrar las tensiones de alimentación de los circuitos ya mencionados. También contiene la pantalla LCD y el teclado matricial que conforman la interfaz de interacción

entre el usuario y el sistema de manera local y el conector serial que permite la comunicación entre el sistema y la interfaz gráfica del PC que se utiliza para la interacción con el usuario de manera remota. Y adicionalmente, contiene pequeños conectores que permiten medir las señales que representan los cruces entre fases, los cruces por cero de la fase principal, las ventanas de conducción permitidas para cada SCR y los pulsos de disparo de los SCR's generados por el sistema de control.

Figura 3.18. Bosquejo del panel acrílico que es la plataforma de conexión para el Rectificador Controlado.



Por la parte trasera del panel van ubicados los SRC's y diodos con sus respectivos pines conectados a las borneras y las tarjetas que contienen las redes Snubber de protección para cada SCR. Los dispositivos están subdivididos en grupos de a tres y se encuentran atornillados sobre la parte plana de tres disipadores, los cuales a su vez, están soportados en sus partes superior e inferior sobre dos barras metálicas que sobresalen por la parte de atrás. Por lo tanto, como en total se tienen 6 SCR's y 3 diodos, cada disipador contiene dos SCR's, ubicados en la parte de arriba y en la parte de abajo y un diodo ubicado en la mitad.

En las siguientes figuras puede verse la ubicación de las barras metálicas en la parte trasera del panel acrílico:

Figura 3.19. Vista General del panel.

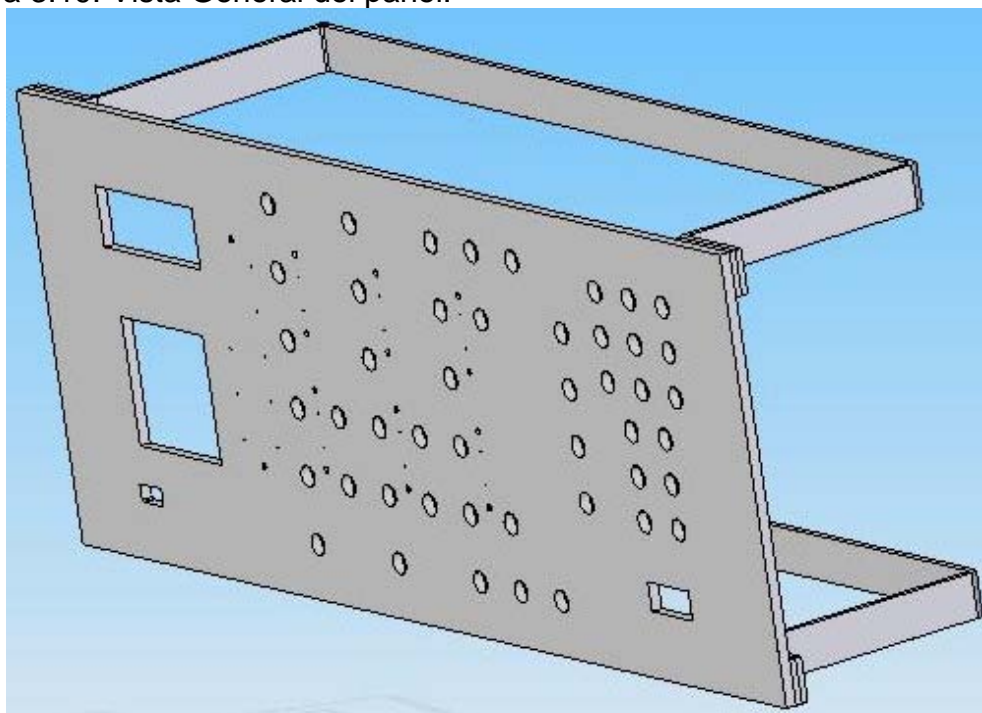
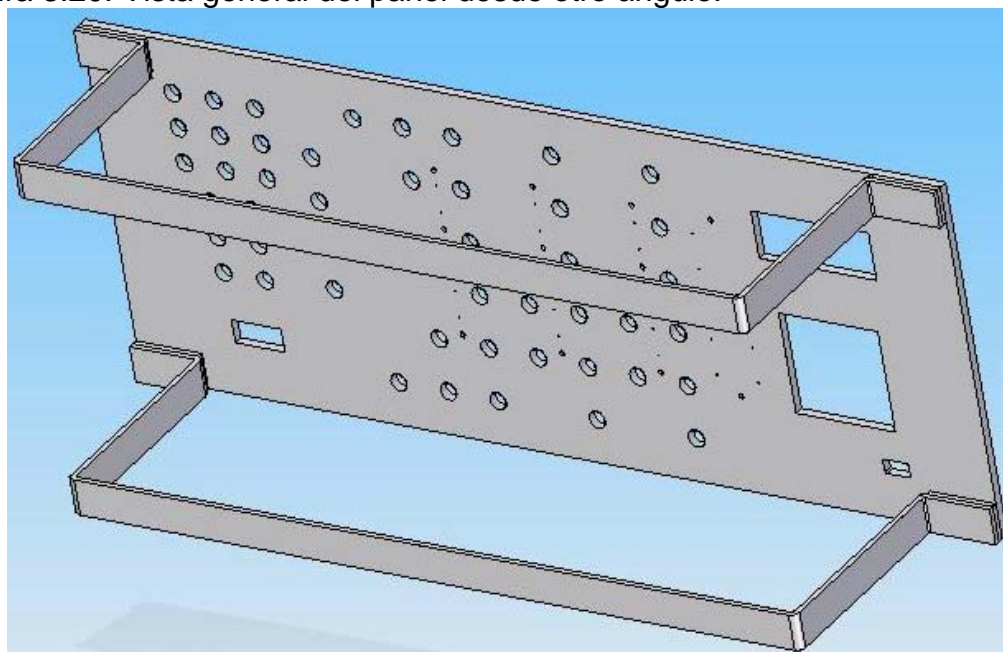


Figura 3.20. Vista general del panel desde otro ángulo.



A continuación se mostrarán los planos con las medidas exactas de todas las partes que componen el panel de conexión de los Rectificadores Controlados:

Figura 3.21. Plano General del Panel de conexión.

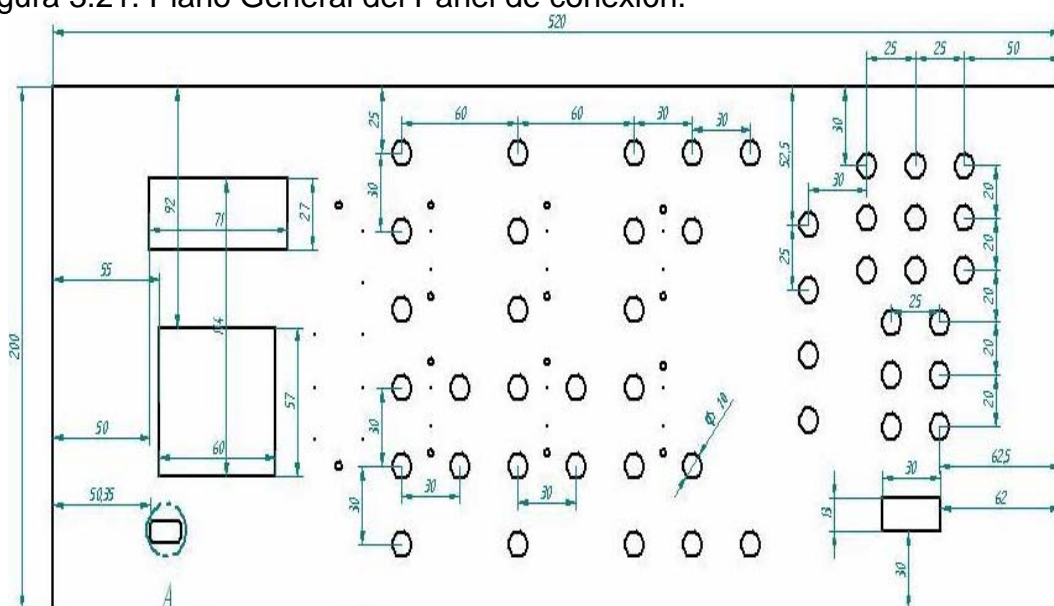
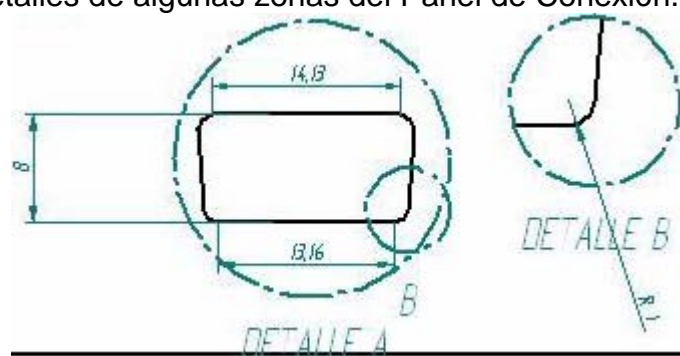


Figura 3.22. Detalles de algunas zonas del Panel de Conexión.

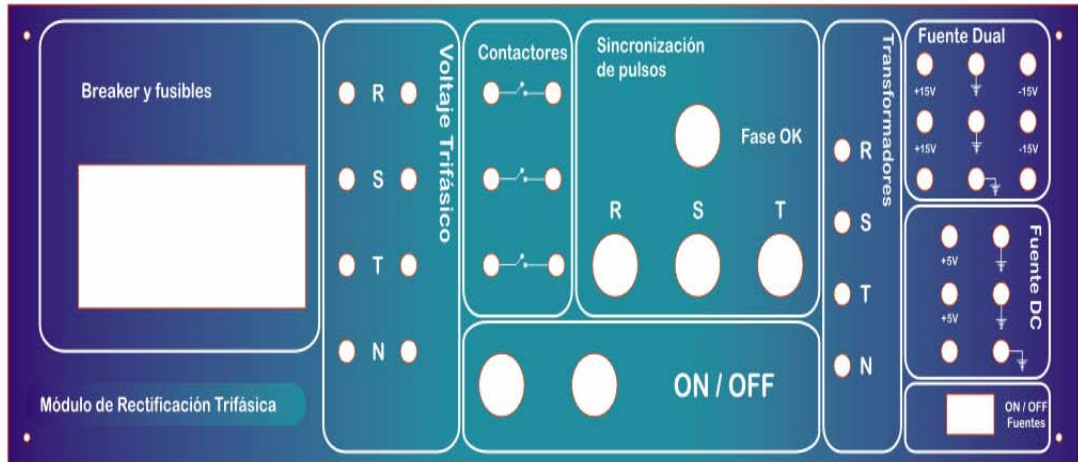


66

También contiene las borneras desde las cuales se obtienen las señales de las fuentes de alimentación de DC que se utilizan para los circuitos del sistema de entrenamiento y que se deben conectar en el panel de conexión, las señales de la red trifásica obtenida de los transformadores de reducción que deben conectarse a las entradas del panel de conexión y un módulo adicional para verificar la sincronización y los niveles de tensión de las fases.

En la siguiente figura se observa un bosquejo del panel de alimentación:

Figura 3.25. Bosquejo del panel de alimentación.



Cabe anotar que aunque el panel de alimentación puede ser utilizado como alimentador para diferentes módulos y no se restringe su uso al Sistema de Entrenamiento en Rectificadores Controlados, se desarrolló de manera conjunta con este módulo y por tal motivo se menciona.

3.3. ETAPA SOFTWARE

En esta etapa se realizó inicialmente el diseño arquitectural del Sistema de Entrenamiento en Rectificadores Controlados para determinar las diferentes funciones que se deben ejecutar y la interacción necesaria entre ellas, para realizar el control del sistema. Después de tener las funciones definidas y saber la manera en que éstas deben interactuar, se implementaron dichas funciones como algoritmos y rutinas en el microcontrolador escogido como dispositivo de control, y por último, se realizó la depuración y las pruebas de los mismos.

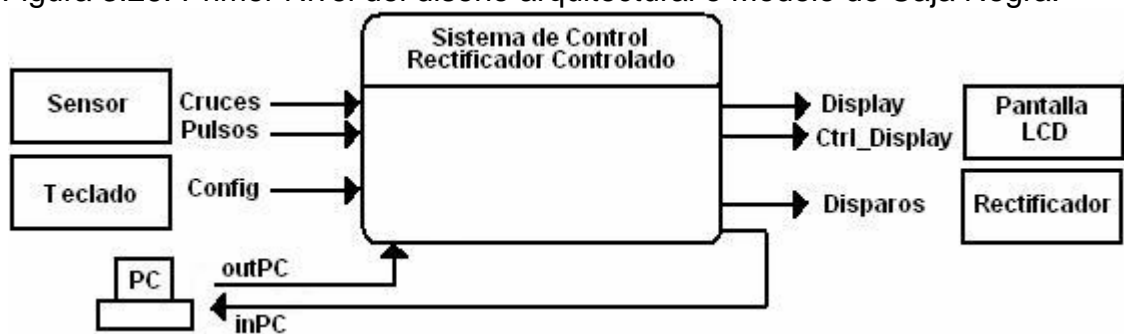
3.3.1. Diseño Arquitectural. El Diseño Arquitectural de un sistema es una representación mediante bloques funcionales que muestra el funcionamiento detallado del mismo; en otras palabras, muestra paso por paso qué es lo que entra, qué hace, cómo funciona y qué salidas entrega. Consta de mínimo tres niveles y comienza por el primer nivel también conocido como “Modelo de la Caja Negra”, donde se observa al sistema como algo desconocido al que entran unas señales y entrega a la salida otras, tiene niveles intermedios donde se examinan los bloques de funciones principales y se llega hasta el último

nivel, donde se examina en detalle todos los bloques funcionales que se encuentran al interior de otros bloques y las diferentes señales internas que permiten la interacción entre ellos.

Para el Sistema de Entrenamiento en Rectificadores Controlados se definieron cinco niveles en el diseño arquitectural:

- **Primer Nivel.** Como ya se mencionó, en el primer nivel de todo diseño arquitectural se tiene básicamente un sistema “desconocido” al cual ingresan unas señales, se procesan de una manera transparente para el usuario final y se obtiene como resultado otras señales a la salida.

Figura 3.26. Primer Nivel del diseño arquitectural o Modelo de Caja Negra.



Como puede observarse en la figura, las señales que se tienen a la entrada son: “Cruces” y “Pulsos” que vienen del circuito sensor y contienen la información acerca de los instantes donde se presentan cruces entre dos fases y además, permiten identificar cuáles fueron las fases que se cruzaron; la señal “Config” que viene del teclado matricial utilizado como medio de interacción entre el sistema y el usuario, la cual contiene la información de configuración digitada por el usuario. Y por último, la señal “outPC” que viene desde el PC donde se encuentra la interfaz gráfica de visualización, monitoreo y mando y también contiene información de configuración.

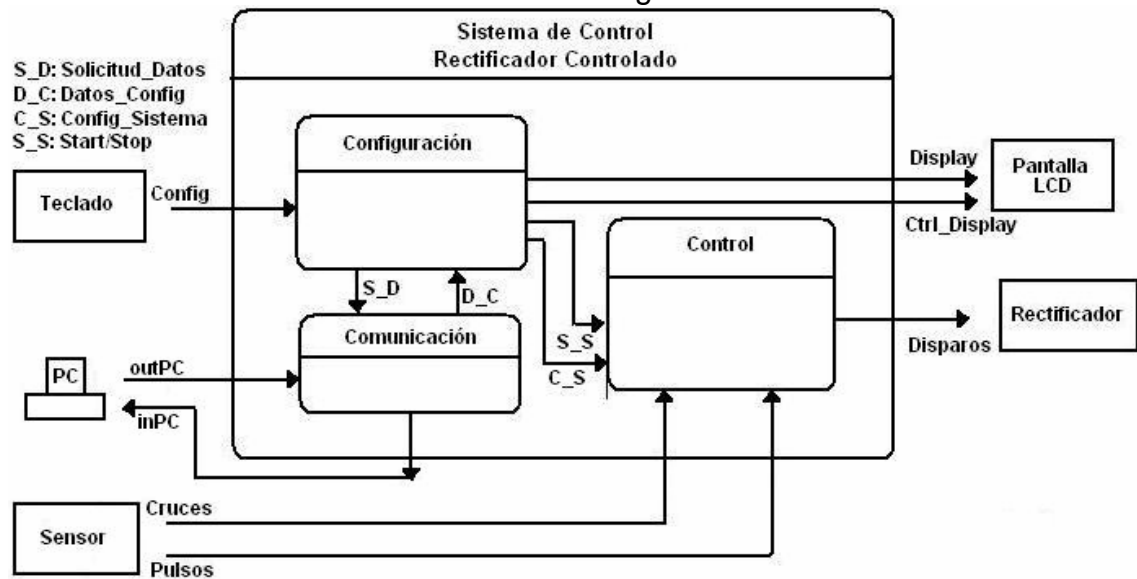
Tales señales son procesadas de alguna manera desconocida por un sistema que hasta este momento es transparente; y finalmente, se obtienen a la salida las señales “Display” y “Ctrl_Display”, que van a la pantalla LCD que permite la visualización de los diferentes estados del sistema. La señal “Disparos” que contiene los pulsos de disparo de los SCR’s de los distintos rectificadores implementados y la señal “inPC” que transmite información desde el sistema hacia la interfaz gráfica de visualización, monitoreo y mando.

- **Segundo Nivel.** En este nivel pueden observarse los bloques funcionales más generales con los que cuenta el sistema para realizar el procesamiento de las señales de entrada analizadas en el primer nivel. Tales bloques funcionales son:

- Configuración.
- Comunicación.

- Control.

Figura 3.27. Segundo Nivel del diseño arquitectural. Pueden verse los bloques funcionales internos del sistema de manera general.



Configuración: La función principal que debe ejecutar este bloque es realizar la configuración, tanto inicial como en línea, de los parámetros de funcionamiento del sistema a partir de los datos que recibe de parte del usuario. En otras palabras, debe recibir los datos que vienen desde el teclado a través de la señal “Config” o desde el PC que contiene la interfaz gráfica de visualización, monitoreo y mando, que son las interfaces de interacción con el usuario, interpretarlos y manipular las variables donde se almacena dicha configuración para que ésta sea reconocida por el control del sistema. Adicionalmente, debe manejar la visualización de dicha configuración en una pantalla LCD mediante las señales “Display” y “ctrl._Display” y permitir que dicha información pueda visualizarse también en la interfaz gráfica que se encuentra en el PC, estableciendo una interacción adecuada con el subsistema de “Comunicación” para transmitir y recibir datos.

Comunicación: Este bloque se encarga de establecer un “puente” o interfaz entre el subsistema de “Configuración” y la interfaz gráfica que se encuentra en el PC, cuando la configuración del sistema se realiza de manera remota (desde el PC) o cuando se necesita que el estado del sistema sea visualizado en dicha interfaz. Básicamente, recibe una solicitud desde el bloque de “Configuración” mediante la señal “Solicitud_Datos”, en donde se le dice que se requiere transmitir una trama para solicitar un dato de configuración o simplemente para enviar una información que debe ser visualizada por el usuario en la interfaz gráfica. Se debe identificar el tipo de solicitud que recibió y enviar la trama de datos correspondiente mediante la señal “inPc.”; recibir el dato enviado por la interfaz gráfica del PC a través de la señal “outPC” y finalmente, retransmitir la información de interés hacia el bloque de “Configuración” mediante la señal “Datos_Config”.

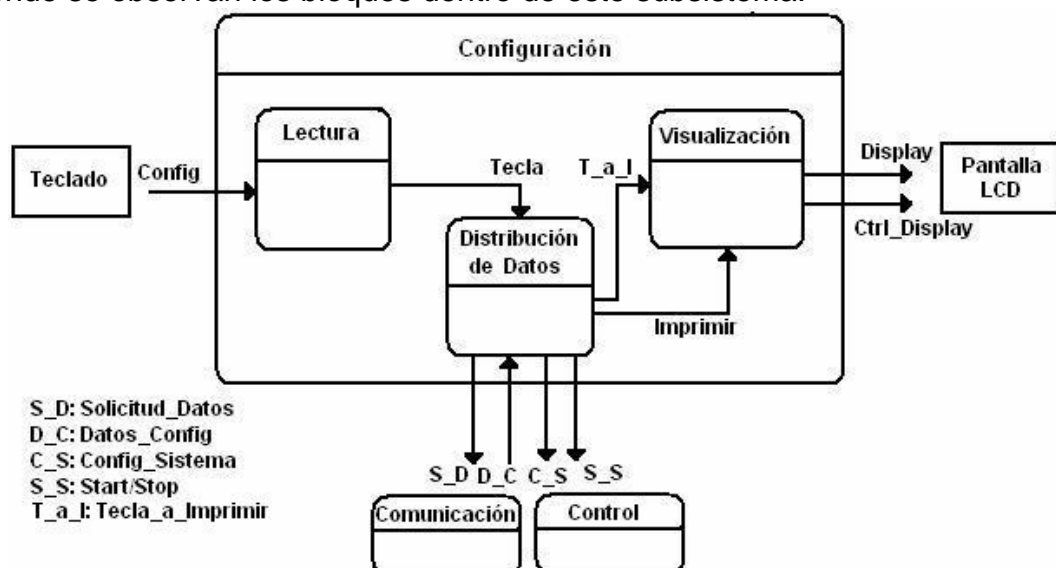
Control: Este subsistema recibe la información de configuración para el funcionamiento del sistema mediante la señal “Config_Sistema”, la cual, contiene las variables donde se almacenan los datos de la configuración realizada; dicha configuración, que puede ser inicial o en línea, es evaluada y de acuerdo a ésta, se selecciona y ejecuta una estrategia de control que depende particularmente de la topología escogida para el funcionamiento. Adicionalmente, recibe la señal de “Start/Stop” que le indica cuándo iniciar el control y cuándo detenerse, y las señales “Cruces” y “Pulsos” que llegan del sensor y que le permiten conocer al dispositivo de control el estado de las señales correspondientes a las fases de la línea de alimentación para sincronizarse con las mimas, y permitirle realizar una acción para generar la secuencia de disparos de los SCR's del circuito rectificador.

- **Tercer Nivel.** En este nivel se realiza una mirada más profunda del sistema, observando hacia el interior de los bloques de funciones principales que se definieron en el nivel anterior; debido a que cada subsistema definido debe ejecutar una función principal que está ligada al cumplimiento de otras funciones más pequeñas y a la interacción entre ellas, cada bloque de estos se subdivide en otros más pequeños que permiten cumplir esas funciones particulares.

Para empezar, el subsistema de *Configuración* se subdivide en los siguientes bloques:

- Lectura.
- Distribución de datos.
- Visualización.

Figura 3.28. Nivel 3 del diseño arquitectural en el subsistema de Configuración donde se observan los bloques dentro de este subsistema.



Lectura: Es el encargado de: detectar que se están ingresando datos por el teclado mediante la recepción de la señal “Config” que viene directamente desde él, recibir dichos datos de manera correcta, asignarles un código para poder identificar la tecla que se presionó y el momento en el cual se hizo y finalmente, verificar ese código para darle una representación o un valor en el subsistema de “Distribución de Datos”. En otras palabras, es el subsistema del bloque de “Configuración” que se encarga de ejecutar la función particular de recibir los datos de configuración digitados por el usuario de manera local, para luego en otro subsistema procesarlos.

Distribución de datos: Es el “cerebro” o elemento central del bloque de “Configuración”, debido a que es el encargado de asignar valores a las variables donde se almacenan los datos de la configuración realizada, dependiendo de los datos que se reciben del subsistema de “Lectura” con respecto a las teclas presionadas y el instante dónde se presionan, mediante la señal “Tecla”, y de los datos recibidos por el bloque de “Comunicación” mediante la señal “Datos_Config”; los datos que contienen ambas señales corresponden a la configuración digitada por el usuario de manera local (teclado) o remota (PC) y son los que deben ser administrados para enviar la información de control mediante las señales “Config_Sistema” y “Start/Stop” al bloque de control. Adicionalmente, es el que determina cuándo se necesita recibir datos desde la interfaz gráfica que se encuentra en el PC y cuándo se deben enviar datos a la misma para que sean visualizados, por lo tanto, es la que genera todas las solicitudes de datos que el sistema realiza al PC mediante el bloque de “Comunicación”. En otras palabras, es el que utiliza el subsistema de “Comunicación” para recibir y transmitir datos desde y hacia el PC.

Además, este subsistema controla de manera general la visualización del menú de configuración y del estado del sistema en la pantalla LCD porque define el momento donde se debe imprimir en pantalla un mensaje y el tipo del mensaje a mostrar de acuerdo al estado del sistema. En otras palabras, coordina la configuración inicial o en línea del sistema, porque le muestra al usuario las opciones que tiene disponibles para que éste pueda introducirlas a través del teclado, es decir, permite que las teclas tengan valores diferentes de acuerdo al momento de la configuración en el cual el sistema se encuentre. Esto lo hace mediante las señales externas “Imprimir” y “Tecla_a_Imprimir” que se dirigen hacia el subsistema de visualización, y mediante otras señales internas que en este nivel no pueden visualizarse.

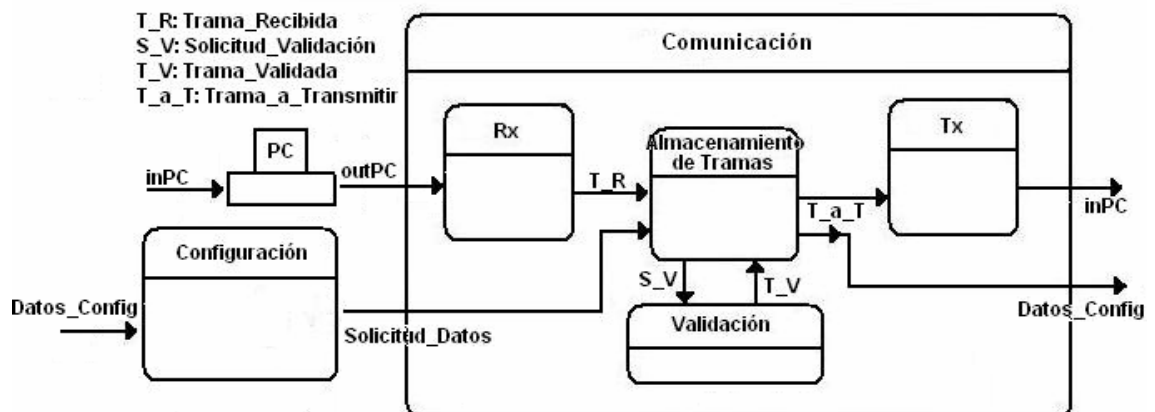
Visualización: Tiene como función imprimir en la pantalla LCD los mensajes correspondientes al menú de configuración y al estado del sistema. Internamente, tiene almacenados los mensajes que deben imprimirse carácter por carácter y las rutinas de escritura de datos y de configuración de la pantalla. Cada que se necesita imprimir un mensaje o un carácter que ha sido digitado por el usuario desde el teclado, el bloque de “Distribución de Datos” le envía información mediante las señales “Imprimir” y “Tecla_a_Imprimir” donde le indica el mensaje que debe aparecer en pantalla dependiendo del estado del

sistema o el caracter que debe imprimirse; y este subsistema lo que hace es acceder al lugar donde se encuentran almacenados los mensajes, tomar los caracteres del mismo en el orden que se encuentran y utilizar las rutinas de escritura de datos y de configuración para generar las señales “Display” y “Ctrl_Display” para poder imprimirlos. La dirección del lugar donde se encuentran almacenados los datos se especifica en la señal “Imprimir” y la señal “Tecla_a_Imprimir” contiene el valor de la tecla presionada por el usuario que debe aparecer en la pantalla; en este último caso, la señal “Imprimir” indica que el carácter que se va a mostrar en pantalla viene desde el teclado.

El siguiente bloque es el de *Comunicación*, el cual está subdividido en cuatro bloques funcionales más pequeños que se listan a continuación:

- Transmisión.
- Recepción.
- Almacenamiento de Tramas.
- Validación.

Figura 3.29. Tercer nivel del diseño arquitectural para el bloque de comunicación.



Transmisión: Este bloque es el encargado de transmitir las tramas de datos al PC. Para él es transparente el significado de la información a transmitir, es decir, no le interesa que la trama sea de solicitud de datos de configuración, de respuesta por un mensaje que el PC ha enviado o de envío de datos para visualizar en la interfaz gráfica, si no que simplemente se dedica a recibir cada uno de los caracteres que componen la trama y ponerlos uno por uno en el registro TXREG del microcontrolador. Cuando un carácter se encuentra almacenado en dicho registro, la unidad USART del microcontrolador que maneja la comunicación serial se encarga de transmitirlo bit a bit, a una velocidad de 9600 bits por segundo y adicionando un bit de inicio de transmisión y otro de final de transmisión al mensaje. Esta unidad USART es independiente de este bloque funcional y se encuentra por fuera del diseño arquitectural, ya que corresponde a una unidad de hardware que contiene el microcontrolador y no a una rutina de software que ejecuta una función.

Recepción: Se encarga de recibir los datos que son transmitidos desde el PC y que se encuentran almacenados en el registro RCREG del microcontrolador. Básicamente, este bloque detecta que llegó un dato mediante la atención de la rutina de servicio de interrupción serial, toma la información del registro RCREG y la almacena en una variable para luego ser enviada al subsistema “Almacenamiento de Tramas” mediante la señal “Trama_Recibida” (que contiene la variable donde se almacenó el dato). La recepción de las tramas se hace carácter a carácter, por ende, la trama completa se forma en el bloque de “Almacenamiento de Tramas” después de realizarle un procedimiento para su validación. Para este subsistema, el contenido de los datos que llegan desde el PC también es transparente, por lo tanto, no identifica si el carácter que recibe corresponde a una trama con información de configuración, o a una trama de respuesta o a una trama de solicitud de datos.

La recepción de datos en el nivel más bajo la realiza la USART del microcontrolador a nivel de hardware, por lo tanto, no se incluye dentro del bloque de “Recepción” y tampoco dentro del diseño arquitectural del sistema. Esta unidad es la que establece contacto con el PC a una velocidad de 9600 bits por segundo y recibe uno por uno los 8 bits de datos que corresponden al carácter recibido, más el bit de inicio y el bit de stop; desprecia los bits adicionales y agrupa esos 8 bits en el registro RCREG.

Almacenamiento de Tramas: Este subsistema es la unidad central del bloque de “Comunicación”. Ejecuta tres funciones principales: La primera es establecer contacto con el bloque de “Configuración” recibiendo las solicitudes de datos que realiza el sistema, a través de la señal “Solicitud_Datos”; la segunda es seleccionar de las tramas almacenadas la trama que se debe transmitir hacia el PC dependiendo del contenido de la solicitud de datos que fue previamente evaluada, para luego enviarla hacia el bloque de “Transmisión” mediante la señal “Trama_a_Transmitir”. Y la tercera, consiste en recibir carácter a carácter la trama de datos que es enviada desde el PC, reconstruirla correctamente y enviarla hacia el subsistema de “Configuración” mediante la señal “Datos_Config”, para que allí pueda ser procesada. Adicionalmente, interactúa con el bloque de “Validación” mediante las señales “Solicitud_Validación” y “Trama_Validada” para validar cada uno de los caracteres que vienen desde el PC antes de reconstruir la trama completa. La señal Solicitud_Validación se utiliza para enviar el carácter recibido al bloque de validación y la señal “Trama_Validada” para recibir la respuesta.

Validación: Su función es recibir un carácter que ha llegado al microcontrolador desde el PC y verificar si éste es el carácter correcto. Para esto, se lleva una cuenta de los caracteres que deben llegar cada que el PC envía una trama y se asigna un número a cada carácter; el número total de caracteres que deben llegar es 10. Luego, se compara el carácter que se recibió a través del bloque de “Recepción” con un carácter predeterminado, que depende de la trama que debe llegar y del número de recepción del carácter. La trama que debe llegar depende a su vez del estado del sistema, el cual, se indica al bloque de “Comunicación” mediante la señal “Solicitud_Datos” que se recibe en el

subsistema de “Almacenamiento de Tramas”; por lo tanto, dicho bloque debe comunicar ese estado al bloque de “Validación” mediante la señal “Solicitud_Validación”. Cuando el carácter ha sido validado, se responde al subsistema de “Almacenamiento de Tramas” mediante la señal “Trama_Validada” para que éste, lo acomode en la trama que está organizando en caso de ser la validación correcta, o para que envíe al subsistema de transmisión mediante la señal “Trama_a_Transmitir” la trama que se debe enviar al PC indicando que se produjo un error en la recepción.

Cabe anotar que aunque todas las tramas que se reciben son diferentes y cada una depende del estado del sistema, todas tienen 4 caracteres comunes: los tres primeros que son “AAB” y significan Inicio de Trama, Dirección Origen (A para el PC) y Dirección Destino (B para el microcontrolador), respectivamente, y el último carácter (carácter número 10) que es “Z”, el cual, significa Fin de Trama.

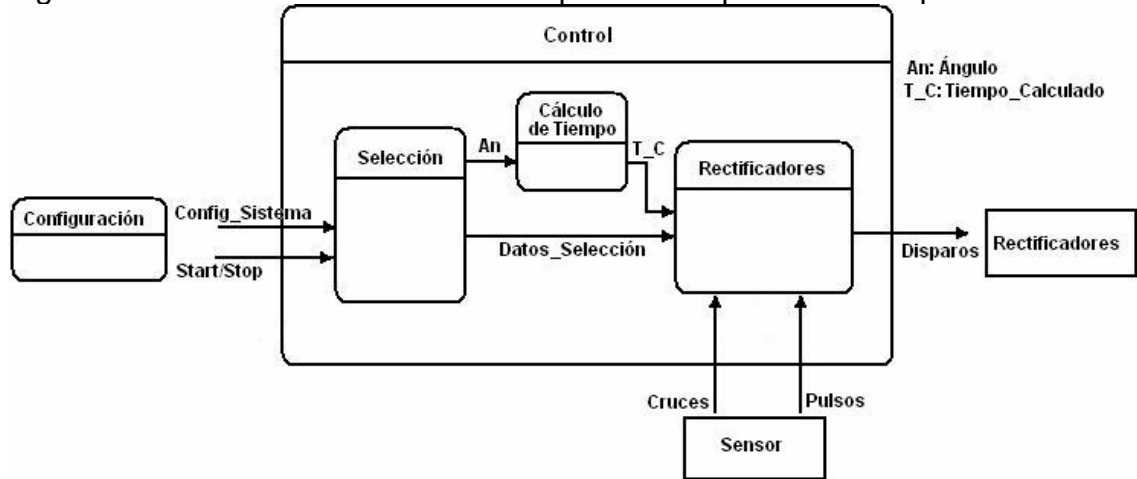
Las tramas recibidas por el bloque de “Comunicación” a través de los subsistemas “Recepción”, “Almacenamiento de Tramas” y “Validación”, con su respectivo significado son:

- “AABT□A□□□Z”: Esta trama contiene la configuración inicial que el usuario introdujo al sistema a través de la interfaz gráfica de visualización, configuración y monitoreo. El carácter “T” significa “Topología”, el cuadro siguiente corresponde a un número entre 1 y 4 que representa la topología escogida por el usuario, el carácter “A” significa ángulo y los tres cuadritos siguientes contienen un número entre 0 y 180 que corresponde al ángulo de disparo deseado.
- “AABDETENZ”: Esta trama significa detener el sistema y es enviada por el PC cuando el usuario presiona en la interfaz gráfica el botón que se encarga de parar el funcionamiento del mismo.
- “AABCHANGEZ”: Esta indica al sistema de control que se va a modificar un dato de configuración en línea; particularmente, el único dato de configuración que se puede modificar es el ángulo de disparo, ya que para la topología es necesario apagar el sistema y hacer la respectiva conexión de hardware que es consecuente con la topología a seleccionar.
- “AABAMASXXZ”: Trama que indica que se debe incrementar uno al valor del ángulo de disparo que se tiene.
- “AABAMENOSZ”: Trama que indica que se debe restar uno al valor del ángulo de disparo que se tiene.
- “AABENTERXZ”: Esta trama indica que se terminó de modificar el ángulo de disparo en línea.

Finalmente, el bloque de *Control* se subdivide en los siguientes subsistemas:

- Selección.
- Cálculo de Tiempo.
- Rectificadores.

Figura 3.30. Tercer nivel del diseño arquitectural aplicado al bloque de Control.



Selección: Este subsistema es el encargado de recibir y evaluar la configuración del sistema enviada desde el bloque de “Configuración” a través de la señal “Config_Sistema”, y de acuerdo a los valores almacenados en las variables utilizadas, seleccionar la estrategia de control que corresponde a la topología escogida por el usuario y habilitar el bloque “Cálculo de Tiempo” para generar el tiempo correspondiente al ángulo de disparo seleccionado. Adicionalmente, se recibe la señal de “Start/Stop” que debe ser retransmitida al subsistema “Rectificadores” para encender o apagar el sistema en el momento que sea necesario.

Cálculo de Tiempo: Este bloque recibe el valor del ángulo de disparo deseado por el usuario y calcula el tiempo que debe contar el microcontrolador para generar los disparos de los SCR's con el retraso correspondiente a dicho ángulo de disparo. El valor del ángulo de disparo se digita por el usuario, se valida y almacena en el bloque de “Configuración” y éste lo envía hacia el bloque de “Control”, donde es recibido por el subsistema de “Selección” y éste, finalmente, lo retransmite hacia este subsistema mediante la señal “Ángulo”. Mientras que el tiempo que se calculó es enviado hacia el subsistema “Rectificadores” mediante la señal “Tiempo_Calculado”.

Básicamente, el cálculo del tiempo se realiza de la siguiente manera:

- Primero, se calcula un tiempo inicial con la ecuación: $t = \alpha * \left(\frac{8.33ms}{180^\circ} \right)$
- Como el valor del tiempo se obtiene por lo general en formato de punto flotante, se multiplica por 10 para convertirse a entero y no perder la parte decimal (al menos el primer decimal que es el más importante).
- Finalmente, el número obtenido se redondea evaluando el decimal siguiente; si éste es mayor o igual a 5, se suma 1 y si no se deja como está.

Por lo tanto, el tiempo calculado se obtiene en la siguiente escala: 1 corresponde a 100us y 10 corresponde a 1ms. Por ejemplo, si el número que se obtiene del cálculo es 42 significa que se debe contar un tiempo de 4.2ms.

Rectificadores: Este subsistema es el que contiene los diferentes algoritmos de control que se aplican dependiendo de la topología seleccionada; es el bloque principal de todo el sistema de control, ya que es el que genera los disparos de los SCR's a partir de la topología seleccionada, del ángulo de disparo digitado por el usuario y del estado de las fases de la red de alimentación trifásica. Toda esa información llega a este subsistema a través de las señales: "Datos_Selección", que viene desde el subsistema de "Selección" y contiene la topología seleccionada, la fuente de órdenes de control y la señal de inicio y parada (start o stop). "Tiempo_Calculado", que contiene la cantidad de tiempo que debe contar el microcontrolador para generar los retrasos en los disparos y que se genera a partir del ángulo de disparo deseado; y por último, las señales "Cruces" y "Pulsos" que vienen desde el sensor e indican el instante exacto donde se produjo un cruce entre fases (o un cruce por cero si está funcionando una topología monofásica) y el estado de las fases para permitirle al sistema identificar cuáles fueron las que se cruzaron.

De forma general, los algoritmos de control para las diferentes topologías tienen la siguiente estructura de funcionamiento: Se detecta un cruce por cero, en caso de ser una topología monofásica, o un cruce entre fases en caso de ser una topología trifásica. A partir de dicho instante, se inicia el conteo del tiempo correspondiente al ángulo de disparo digitado por el usuario, y cuando dicho tiempo llega al valor límite, se genera el pulso de disparo del SCR que corresponde de acuerdo a la secuencia. Y para el disparo del siguiente SCR, se termina el pulso de disparo generado para el SCR anterior. Cabe anotar que cuando la topología a controlar es trifásica, se debe leer el estado de las señales de la red trifásica que llegan al sub-sistema a través de la señal "Cruces", para identificar las fases que se cruzaron y saber cuál es el SCR que se debe disparar.

- **Cuarto Nivel.** Este nivel se enfatiza en analizar el interior de los bloques de funciones secundarias que se encargan de cumplir las pequeñas tareas de las cuales consiste la tarea o función de uno de los bloques principales. Por lo tanto, los bloques secundarios que se encargan de funciones específicas, también tienen en su interior otros bloques más pequeños que se encargan de dividir la función particular a ejecutar en un conjunto de sub-funciones de menor tamaño.

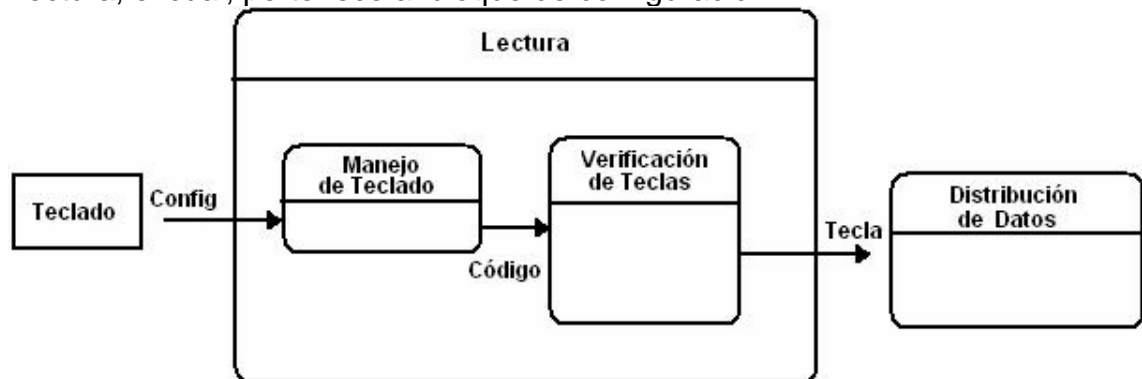
Para empezar, se analizarán los bloques internos del bloque de *Configuración*, los cuales son:

- Lectura:
 - Manejo de Teclado.
 - Verificación de Teclas.
- Visualización:

- Almacenamiento de Mensajes.
- Manejo LCD.
- Distribución de datos:
 - Almacenamiento de Datos.
 - Control de Visualización.
 - Interfaz Com.

Lectura:

Figura 3.31. Cuarto nivel del diseño arquitectural aplicado al subsistema Lectura, el cual, pertenece al bloque de configuración.



Manejo de Teclado: Este subsistema del bloque de “Lectura” es el encargado de ejecutar las rutinas para manejar directamente el teclado matricial con el cual se ingresan los datos de configuración. Recibe la señal que viene desde el teclado matricial llamada “Config” y entrega un código correspondiente a la tecla presionada para su posterior evaluación. Su funcionamiento es el siguiente: Se pone un 1 lógico en uno de los pines de las filas del teclado matricial; después de un tiempo muy pequeño, el 1 lógico se quita de ese pin y se pone en el siguiente y después de otro tiempo igual de corto al anterior, el 1 lógico se quita de nuevo y se pone en el pin siguiente; y así sucesivamente hasta poner el 1 lógico en cada uno de los 4 pines de las filas en instantes diferentes y mantenerlo rotando constantemente a una velocidad muy alta. Cuando se presiona una tecla, se cierra un contacto que conecta una fila y una columna en una matriz y establece un camino entre ambas; por lo tanto, si en ese momento hay un 1 lógico en la fila donde se encuentra ubicada la tecla que se presionó, dicho 1 aparece en el pin de la columna a la cual también pertenece la tecla.

Así, al detectar que se ha presionado una tecla mediante una rutina de servicio de interrupción se toman los 4 bits que se ponen en los pines de las filas y los 4 bits que se leen en los pines de las columnas y se forma una palabra de 8 bits con dos unos y seis ceros que se almacena en una variable para identificar cuál fue la tecla que se presionó. La posición de los dos unos y los seis ceros diferencian una tecla de otra, ya que si por ejemplo, se presiona la tecla que se encuentra ubicada en la segunda columna y en la primera fila, el código que se obtiene es “01000001”, teniendo en cuenta que los bits de la parte alta

corresponden a los pines de las columnas, ubicados de manera descendente, y los de la parte baja a las filas, ubicados de forma ascendente.

Cabe anotar que los pines de las filas del teclado están conectados a la parte baja de un puerto de salida del microcontrolador, por lo tanto, son aquellos que están recibiendo el 1 lógico que rota constantemente; además, su conexión es de manera ascendente, es decir, que el pin que corresponde a la primera fila (Fila donde se encuentran los números 0, 1, 2, 3) está conectado al pin de salida del microcontrolador menos significativo. Mientras que los pines de las columnas están conectados a la parte alta de un puerto de entrada del microcontrolador, que además, cuenta con una interrupción cada que detecta un cambio en el nivel de alguno de sus pines; su conexión es de manera descendente, por lo tanto, el pin que corresponde a la primera columna del teclado (Columna donde se encuentran las teclas 0, 4, 8 y Stop) está conectado al pin de entrada más significativo.

De acuerdo a la conexión anteriormente descrita, los códigos que entrega el subsistema de “Manejo de Teclado” al detectar que se presionó una tecla son:

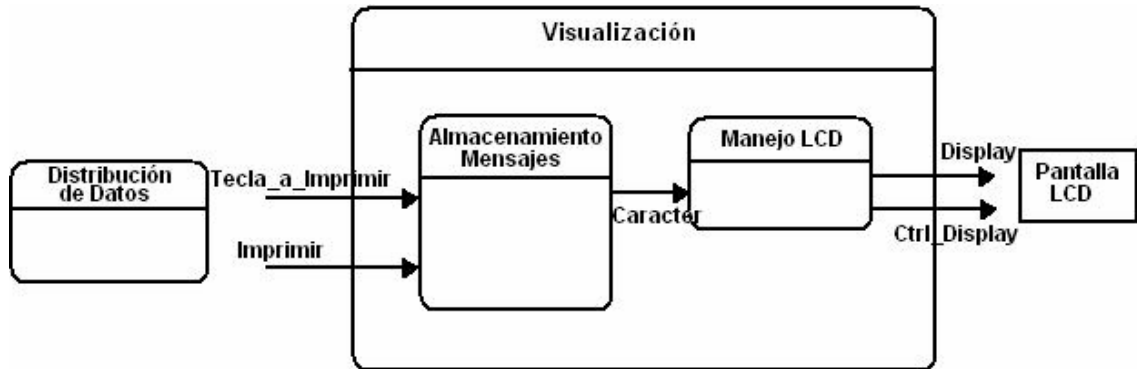
- 0: “10000001”.
- 1: “01000001”.
- 2: “00100001”.
- 3: “00010001”.
- 4: “10000010”.
- 5: “01000010”.
- 6: “00100010”.
- 7: “00010010”.
- 8: “10000100”.
- 9: “01000100”.
- Enter: “00100100”.
- Del: “00010100”.
- Stop: “10001000”.
- Change: “01001000”.
- Más: “00101000”.
- Menos: “00011000”.

Verificación de las Teclas: Este subsistema recibe el código de la tecla que se ha presionado y dependiendo de la posición de los unos en el byte que evalúa, determina cuál fue la tecla que se presionó. Además, dependiendo del estado del sistema en el momento que se presiona dicha tecla, se asigna un valor relativo a la misma; es decir, que si para un momento de la configuración el código de la tecla se utiliza para dar un valor a una variable o para escoger una opción, en otro momento de la configuración ese mismo código de la tecla se utiliza para darle otro valor a la misma variable, o para darle un valor a otra o simplemente para escoger otra opción de configuración. Por ejemplo, si se presiona la tecla que se encuentra ubicada en la tercera columna y en la primera fila, al evaluar el código “00100001” detecta que se trata de la tecla correspondiente al número 2, la cual, dependiendo del estado del sistema

puede ser utilizada para escoger alguna opción de configuración, para mostrarla en la pantalla LCD o para cumplir alguna otra tarea.

Visualización:

Figura 3.32. Cuarto nivel del diseño arquitectural aplicado al subsistema de Visualización.



Almacenamiento de mensajes: Este bloque es el que contiene almacenados los caracteres que conforman los mensajes que se deben imprimir en la pantalla del LCD. Cuando se va a imprimir alguno de estos mensajes, el subsistema de “Distribución de Datos” envía la señal “Imprimir” para indicar la dirección donde se encuentra almacenado el mensaje y este subsistema lo que hace es simplemente dirigirse a ese lugar y extraerlo caracter por caracter. Es similar a una memoria que contiene almacenados los mensajes, y cuando alguno de ellos se necesita se accede a la posición donde se encuentra y se extrae. En el caso que se necesite imprimir un caracter digitado por el usuario desde el teclado, la señal “Imprimir” se lo indica y la señal “Tecla a Imprimir” le envía el caracter al subsistema para que éste lo almacene y lo entregue al subsistema de “Manejo del LCD”.

Manejo del LCD: Contiene las rutinas para escribir datos y enviar palabras de control para configurar el funcionamiento de la pantalla LCD. Su función consiste, inicialmente, en ejecutar una rutina para enviar una secuencia de palabras de control predeterminada para configurar el LCD en un modo de operación, y luego, enviar los caracteres a imprimir junto con las respectivas palabras de control que permiten ubicarlos en un lugar específico de la pantalla cuando sea requerido y de esta manera, formar los mensajes que el sistema requiere mostrar al usuario. Los caracteres, ya sean de datos o instrucciones de control del LCD, se envían mediante la señal “Display” y las señales de control se envían a través de la señal “Ctrl_Display”.

La rutina para enviar una palabra de datos o de control al LCD es la siguiente:

- Habilitar el LCD poniendo un 1 lógico en el pin Enable (pin 6).
- Indicar si la palabra que va a recibir el LCD corresponde a un dato a imprimir o a un comando de control, poniendo un 0 lógico en el pin RS (pin 4) si la palabra es de control o un 1 lógico si es un dato.

- Cargar en el bus de datos del LCD la palabra a enviarle (pines del 7 al 14).
- Generar un retardo de tiempo de mínimo 1.64 ms, que es el tiempo que tarda en ejecutarse la instrucción que mayor tiempo de ejecución consume; dicha instrucción es "Clear Display", que indica al LCD que debe borrar todos los caracteres que se encuentran en la memoria RAM de datos (DD RAM) y por ende, en pantalla, y ubicar el cursor en la primera posición. Las demás instrucciones consumen un tiempo de 40 us aproximadamente.
- Deshabilitar el módulo LCD poniendo un 0 lógico en el pin Enable.
- Y por último, generar un pequeño retarde de tiempo para permitir que el LCD pueda deshabilitarse satisfactoriamente antes de enviar un siguiente dato.

El modo de trabajo del LCD utilizado en esta implementación es:

- Bus de datos de 8 bits.
- Pantalla de dos líneas.
- Caracteres medianos de 5x7.
- Display encendido.
- Cursor apagado y por ende, sin parpadear.
- Visualización normal donde no se desplaza el caracter sino el cursor, cada que se imprime un nuevo caracter.

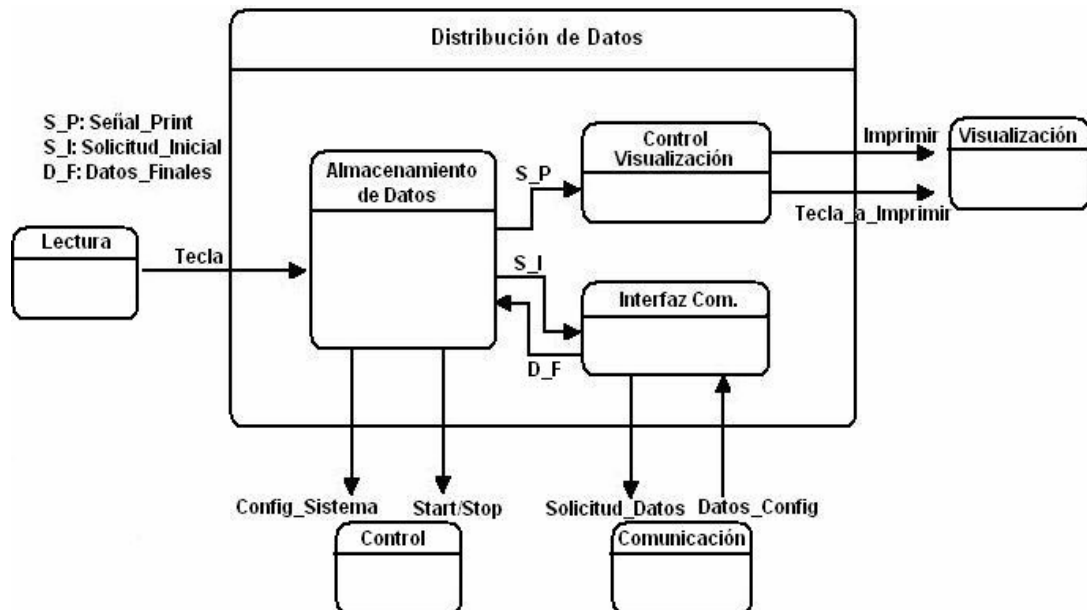
Y por ende, la secuencia de instrucciones que debe enviarse al LCD para configurarlo en el modo de trabajo descrito es:

Tabla 3.3. Instrucciones de configuración inicial utilizadas para trabajar el LCD en el modo ya descrito utilizado para esta implementación.

Palabra	Instrucción	Descripción General	Utilización Específica
01H	Clear Display	Borra el display y pone el cursor en la primera posición.	-----
38H	Function set	Establece el tamaño del bus de datos, el número de líneas del display y el tamaño de los caracteres	Bus de datos de 8 bits, display de dos líneas y caracteres de 5x7.
0CH	Display On/Off Control	Activa o desactiva el display, el cursor y establece si éste debe parpadear o no.	Display en On, Cursor en Off y sin parpadeo.
06H	Entry Mode Set	Establece el sentido de desplazamiento de la información en el display.	Desplazamiento del cursor y no del carácter.

Distribución de Datos:

Figura 3.33. Cuarto nivel del diseño arquitectural aplicado al subsistema de Distribución de Datos.



Almacenamiento de Datos: Su función principal es recibir los datos de configuración que vienen desde el teclado o desde el PC y poner los valores correspondientes a la configuración digitada en las variables predestinadas para ello. Es el subsistema que realiza la función central del bloque de “Configuración”, ya que es el que permite que el sistema tenga condiciones iniciales de arranque y que también, puedan modificarse las condiciones de operación en línea. Cabe anotar que los datos que el sistema recibe desde el teclado y desde el PC ya han sido tratados con anterioridad en otros bloques que ya han sido descritos, y se encuentran en un formato estándar antes de llegar a este subsistema.

También se encarga de controlar la visualización de mensajes en la pantalla LCD y sincronizar la configuración del sistema, debido a que es el subsistema que define el estado del sistema para el cual se tiene asociado un mensaje particular; es el que indica que se deben generar las señales “Imprimir” y “Tecla_a_Imprimir” mediante una señal llamada “Señal_Print” que es enviada al bloque de “Control de Visualización” que también se encuentra al interior del subsistema de “Distribución de Datos”. En dicha señal lo que se comunica básicamente es el estado del sistema cuando se está realizando la configuración (inicial o en línea) para que la señal “Imprimir” se genere con la dirección que corresponde al mensaje que debe aparecer.

Explicado de una manera general, este subsistema funciona de la siguiente manera: Imprime un mensaje Inicial para escoger una fuente de confirmación, que puede ser el microcontrolador o el PC; en caso de escoger el microcontrolador, recibe el dato escogido, imprime un mensaje de confirmación

y espera que lo acepte o lo rechace. Vuelve y repite lo mismo para la selección de la topología, luego permite ingresar el ángulo de disparo y por último, imprime un mensaje final indicando que la configuración fue realizada y que el sistema se encuentra en funcionamiento. Si la opción escogida al inicio es el PC, se imprime un mensaje indicando que se está estableciendo la comunicación con el dispositivo y cuando esta termina, se muestran las opciones de configuración escogidas por el usuario y el mensaje que indica que el sistema se encuentra en funcionamiento. Cuando se comienzan a generar los pulsos de disparo de los SCR's por el bloque de "Control", este subsistema sigue recibiendo datos del teclado por si se requiere modificar el ángulo de disparo o si se requiere detener el sistema; en ambos casos, se muestra en pantalla un mensaje que indique que se va a realizar una modificación o que el sistema se ha detenido.

Adicionalmente, cuando se realiza la configuración desde el PC y el sistema necesita recibir datos es el que realiza la solicitud inicial de los mismos al comunicarse con el subsistema "Interfaz Com".

Interfaz Com: Este subsistema actúa como "puente" entre el bloque de "Almacenamiento de Datos", y el subsistema de "Comunicación", más específicamente hablando, con el bloque de "Almacenamiento de Tramas" que es el encargado de solicitar, entregar y recibir tramas de datos hacia y desde el PC. Cuando el subsistema de "Almacenamiento de Datos" necesita enviar o recibir un dato desde el PC se comunica con este bloque para que envíe la solicitud al subsistema encargado de interactuar directamente con el PC.

Control de Visualización: Este bloque se encarga de generar las señales "Imprimir" y "Tecla_a_Imprimir" para indicar al sistema de "Visualización" que debe mostrar en pantalla un mensaje que se encuentra almacenado en memoria o si se requiere imprimir un carácter que ha sido digitado desde el Teclado. En caso de tratarse de un mensaje almacenado, la señal "Imprimir" envía las direcciones de las posiciones de memoria donde se encuentran almacenados los caracteres de cada mensaje, los cuales dependen del estado del sistema, ya sea en la configuración o en el funcionamiento. Por lo tanto, este subsistema colabora bastante en el procedimiento que se realiza para la configuración inicial porque cada que el bloque de "Almacenamiento de Datos" necesita el ingreso de un dato por el teclado, éste lo solicita al usuario utilizando a este subsistema para controlar el bloque de "Visualización" y mostrar los mensajes correspondientes.

Prosiguiendo con el análisis, cabe anotar que el bloque de *Comunicación* no tiene abstracción en el cuarto nivel del diseño arquitectural, debido a que la complejidad de las funciones que ejecuta no es muy grande y por ende, desde el tercer nivel se pueden ejecutar con facilidad.

Y para terminar, se analizan los subsistemas presentes al interior de los bloques funcionales que componen el subsistema de *Control*, los cuales son:

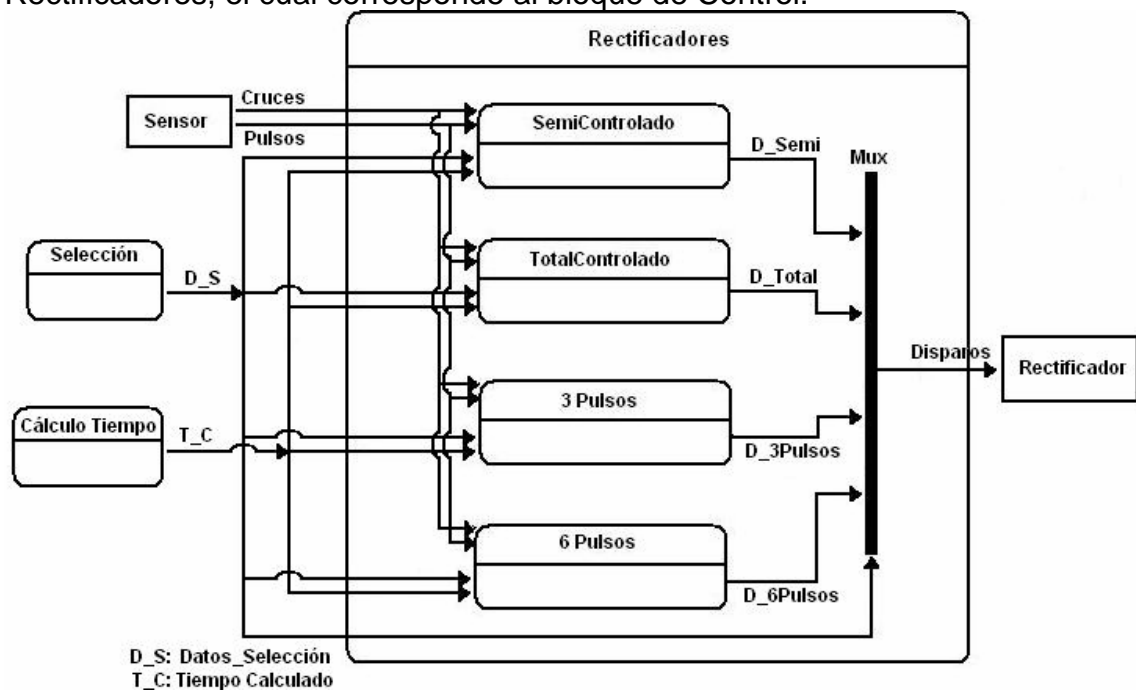
- Selección.

- Cálculo de Tiempo.
- Rectificadores.
 - SemiControlado Monofásico.
 - TotalControlado Monofásico.
 - Tres pulsos Trifásico.
 - Seis pulsos Trifásico.

Como puede observarse, el único de los subsistemas que contiene bloques internos es el subsistema “Rectificadores”.

Rectificadores:

Figura 3.34. Cuarto nivel del diseño arquitectura aplicado al subsistema Rectificadores, el cual corresponde al bloque de Control.



Como puede verse en la figura, este bloque es diferente de los bloques funcionales que se han descrito anteriormente, ya que no tiene los subsistemas internos conectados de manera serial, trabajando de manera casi concurrente e interactuando entre sí, sino conectados de forma paralela, trabajando solo uno a la vez y por ende, sin ningún tipo de comunicación entre ellos. La señal “Datos_Selección” que viene del subsistema “Selección” es la encargada de habilitar el bloque que controla la topología escogida por el usuario y de deshabilitar los otros, de tal manera que cuando un subsistema está trabajando, los otros no lo hacen. El multiplexor de la salida es simplemente para que la señal de salida del bloque pequeño, donde se envía la secuencia de disparos generada, aparezca en la salida del subsistema “Rectificadores”.

A continuación, se hará la descripción de cada uno de los subsistemas que conforman el bloque “Rectificadores”:

Semicontrolado: Este bloque es el encargado de controlar el sistema cuando funciona con las conexiones correspondientes a la topología Semicontrolado Monofásico, el cual tiene un puente con 2 tiristores en la parte superior y 2 diodos rectificadores en la parte inferior. Su funcionamiento básicamente es el siguiente: Detecta que se haya producido un cruce por cero de la fase que lo alimenta y verifica si ocurrió en el semiciclo positivo o negativo para saber cuál SCR debe disparar de la secuencia establecida, mediante la lectura de las señales “Cruces” y “Pulsos” que vienen desde el sensor. A partir de allí inicia el conteo del tiempo que se requiere para generar los disparos de los SCR’s con el ángulo de retraso deseado; cuando dicho tiempo se cumple, se dispara el SCR indicado y se mantiene el pulso hasta que se haya detectado el siguiente cruce por cero de la señal de alimentación. El tiempo límite hasta el cual debe contar para generar el disparo es recibido a través de la señal “Tiempo_Calculado” que viene del subsistema “Cálculo de Tiempo”.

TotalControlado: Se encarga de controlar la topología del Rectificador Monofásico Totalmente Controlado, que es el que tiene un puente completo de 4 SCR’s. Su funcionamiento es muy similar al subsistema de control del Rectificador Semicontrolado, ya que también detecta un cruce por cero de la fase que lo alimenta, identifica si el cruce es en el semiciclo positivo o en el negativo e inicia en ese momento el conteo del tiempo que necesita para generar el disparo de los SCR’s con el ángulo de retraso deseado. Cuando dicho tiempo se cumple, se generan los pulsos para dispar la pareja de SCR’s que corresponden de acuerdo a la secuencia establecida, los cuales, se mantienen hasta que se detecte el siguiente cruce por cero. La única diferencia de éste algoritmo de control con respecto al anterior, es que cuando se ejecuta éste se deben disparar dos SCR’s al tiempo y no solo uno, por lo tanto, la misma señal de salida se debe poner en dos pines de salida diferentes.

Tres Pulsos: Este subsistema controla el circuito rectificador cuando funciona mediante la topología Rectificador Trifásico de Media Onda o de Tres Pulsos, el cual, consta de tres tiristores, donde cada uno está conectado a una fase del sistema; como el tiristor es un dispositivo unidireccional, este circuito solo conduce durante cada uno de los semiciclos positivos de las fases. Su principio de funcionamiento es el siguiente: Primero, se detecta que hubo un cruce entre dos fases cualesquiera de la red de alimentación trifásica, en el semiciclo positivo únicamente; luego, se deben leer los estados de las tres fases en dicho instante para poder identificar cuáles fueron las que se cruzaron y así poder identificar el SCR que se debe disparar de acuerdo a la secuencia de disparo determinada. En otras palabras, hay que sincronizarse con la red de alimentación para ubicarse correctamente al interior de la secuencia de disparo.

Inmediatamente después se debe iniciar el conteo del tiempo requerido para generar el ángulo de retraso en el disparo de los SCR’s que ha sido seleccionado por el usuario; y cuando dicho tiempo es igual al valor límite generado en el subsistema de “Cálculo_de Tiempo”, se dispara el SCR que corresponde de acuerdo al estado de las señales que previamente analizó. Este pulso se mantiene hasta que se detecte el siguiente cruce entre dos fases,

el cual, ocurre siempre en el semiciclo negativo (porque el cruce donde se inicia el conteo ocurre en el semiciclo positivo).

El cruce entre fases que se toma como referencia para generar los ángulos de disparo se detecta únicamente en el semiciclo positivo porque esta topología no permite que se rectifiquen los semiciclos negativos, debido a que los SCR's son dispositivos unidireccionales, que aunque en algunas ocasiones conducen con polaridad invertida, necesitan estar polarizados en directa para arrancar a conducir. Cabe anotar que solo se tienen 120° entre dos cruces en el lado positivo, por lo tanto, si se necesita disparar los SCR's con un ángulo superior, cuando se detecte el siguiente cruce en el lado positivo para iniciar una nueva cuenta de tiempo, el conteo del SCR anterior no ha terminado; por lo tanto, es necesario llevar dos cuentas independientes de tiempo para evitar que cuando este fenómeno ocurra, se pierda el tiempo que se ha contado para el SCR que debía dispararse en el cruce anterior, pero que no se ha disparado por el valor grande de su ángulo.

Seis Pulsos: Este bloque controla el circuito cuando funciona con la topología Rectificador Trifásico Controlado de Onda Completa o de Seis Pulsos, que es el que consta de un puente trifásico de 6 tiristores, conectados de a dos por cada fase, con el objetivo de rectificar la onda para los semiciclos positivos y también para los negativos de cada fase. El funcionamiento de este bloque es el siguiente: Se detecta que hubo un cruce entre dos fases cualesquiera de la red de alimentación trifásica, tanto en el lado positivo como en el negativo. Se lee el estado de las tres fases en el instante exacto donde se detecta el cruce para establecer las fases que se cruzaron y el lado donde lo hicieron; esto con el objetivo de ubicarse dentro de la secuencia de disparo predeterminada e identificar la pareja de SCR's que se debe disparar que acuerdo a la misma. Inmediatamente después, se debe iniciar el conteo del tiempo correspondiente al ángulo de retraso deseado, y cuándo éste termina porque se alcanzó el valor límite generado en el subsistema "Cálculo_de_Tiempo" del bloque de "Control", se generan los pulsos de disparo de la pareja de SCR's que corresponde, la cual, se determinó en el análisis del estado de las fases. Tales pulsos deben mantenerse hasta que se detecte el siguiente cruce entre dos fases, sin importar que ocurra en el lado positivo o negativo.

Cabe anotar que se tienen únicamente 60° de separación entre dos cruces de fases consecutivos (uno en el lado positivo y otro en el lado negativo), por lo tanto, si se requiere disparar un pareja de SCR's con un ángulo de retraso mayor, el conteo del tiempo del nuevo disparo comienza cuando aún no ha terminado el conteo del ángulo anterior. Y si el ángulo de disparo es mayor a 120° , serán dos las parejas de SCR's a las cuales se les comienza la cuenta del tiempo antes de disparar la primera. Por tal motivo, se deben llevar tres cuentas de tiempo independientes, las cuales se activan una detrás de la otra cuando se detecta un cruce. Por ejemplo; arranca el sistema, se detecta el primer cruce y se activa la primera cuenta de tiempo para un ángulo de 135° .

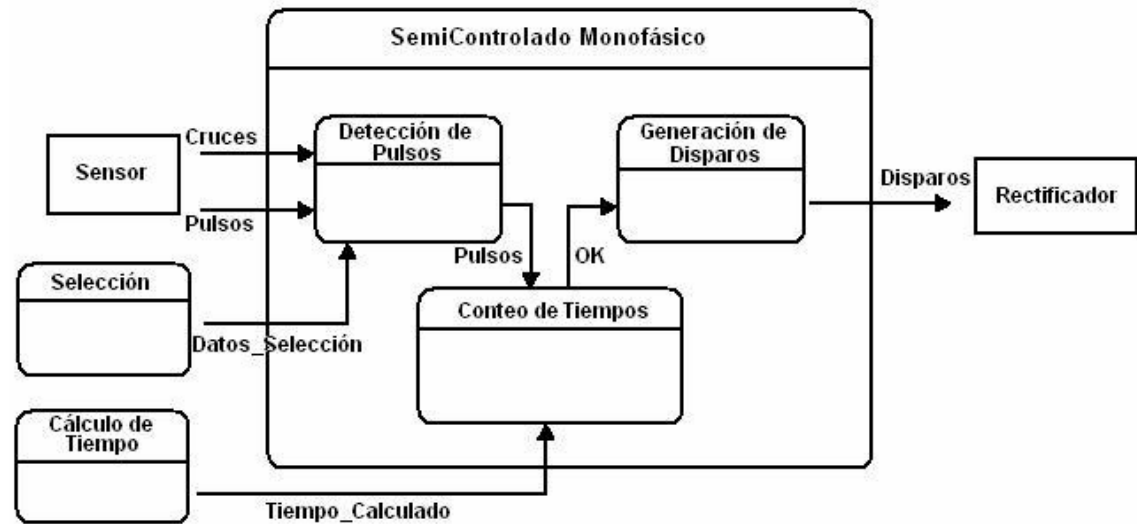
Cuando se detecta el siguiente cruce, se activa el segundo conteo de tiempo pero no se debe perder el conteo del primero, el cual va en aproximadamente 2.78ms, correspondiente a los 60° de separación entre cruces. Y cuando llega el tercer cruce, se debe iniciar la tercera cuenta de tiempo, sin perder la información de la primera cuenta que va en 5.55ms correspondientes a 120°, ni tampoco de la segunda que va en 2.78ms correspondientes a 60°. Finalmente, cuando se cumplen los 6.25ms correspondientes a los 135° y se dispara la pareja de SCR's correspondiente al primer cruce detectado, el segundo conteo va en 3.47ms que equivalen a 75° y el tercero va en 0.69ms que corresponden a 15°. Razones por las cuales, cuando llega un cuarto cruce, se utiliza la unidad que se utilizó para contar el tiempo cuando ocurrió el primer cruce, la cual ya está disponible y de esta manera, no perder las cuentas que se llevan en las unidades que llevan los tiempos transcurridos para el segundo y el tercer cruce.

- **Quinto Nivel.** En este nivel de abstracción solo se tiene al subsistema de "Control" de los tres bloques funcionales principales, particularmente hablando, a los bloques internos que se encuentran en el subsistema "Rectificadores", que es uno de los encargados de las funciones secundarias al interior del subsistema de "Control". Las subdivisiones al interior de dichos bloques están dadas de la siguiente manera:

- SemiControlado Monofásico:
 - Detección de Pulsos.
 - Conteo de Tiempos.
 - Generación de Disparos.
- Totalmente Controlado Monofásico:
 - Detección de Pulsos.
 - Conteo de Tiempos.
 - Generación de Disparos.
- Tres Pulsos Trifásico:
 - Detección de Pulsos.
 - Conteo de Tiempos.
 - Lectura de Señales.
 - Generación de Disparos.
- Seis Pulsos Trifásico:
 - Detección de Pulsos.
 - Conteo de Tiempos.
 - Lectura de Señales.
 - Generación de Disparos.

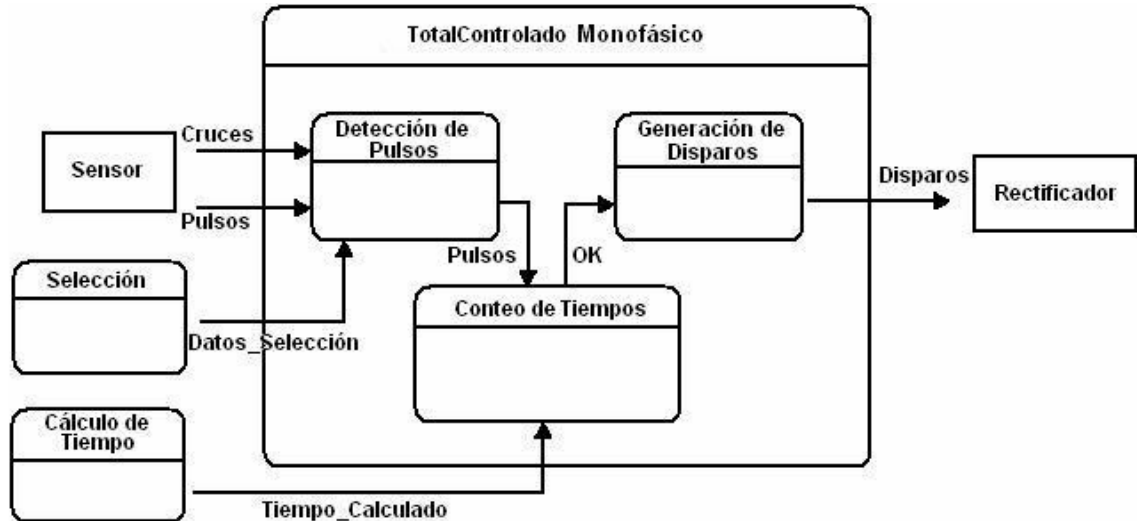
SemiControlado Monofásico:

Figura 3.35. Quinto Nivel del Diseño Arquitectural aplicado al subsistema SemiControlado Monofásico, del bloque Rectificadores.



TotalControlado Monofásico:

Figura 3.36. Quinto Nivel del diseño arquitectural aplicado al bloque TotalControlado Monofásico.



Como puede observarse, este subsistema es similar al bloque SemiControlado Monofásico, debido que el algoritmo que se utiliza para controlar ambas topologías es el mismo.

Detección de Pulsos: Es el encargado de detectar los pulsos que corresponden a los cruces por cero de la onda de alimentación, mediante la atención de una rutina de interrupción que se produce cada que llega un pulso a una entrada del microcontrolador. Cuando se detecta que ha llegado un pulso, verifica el estado de la señal que contiene la ventana de conducción y activa el

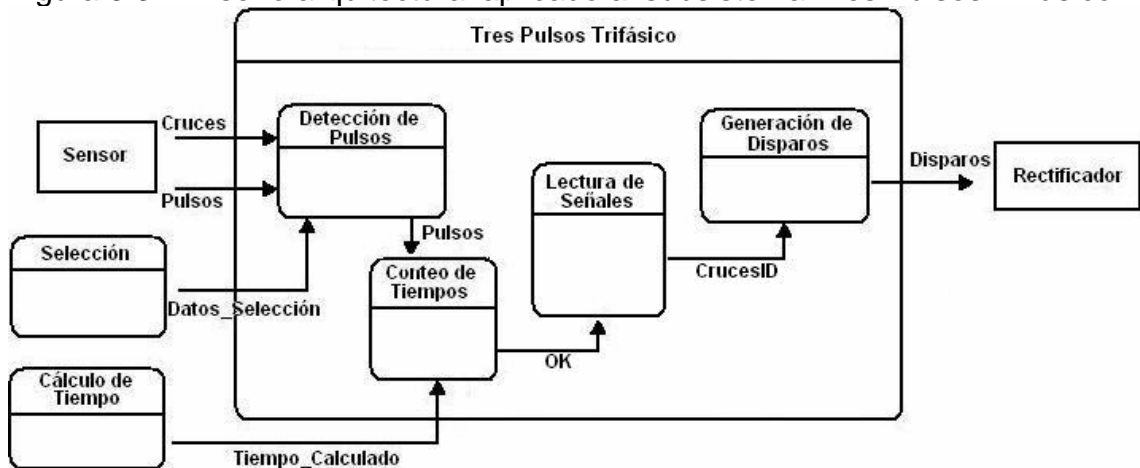
temporizador que corresponde; en otras palabras, es el encargado de enviar la señal de activación a los temporizadores cuando detecta un cruce por cero. Adicionalmente, recibe la señal “Datos_Selección” para saber si el subsistema completo debe activarse o no.

Conteo de Tiempos: Contiene los temporizadores que generan la base de tiempo para llevar el conteo de los tiempos correspondientes al ángulo de disparo deseado. Cuando se detecta un cruce en el subsistema anterior, éste indica la señal para activar los temporizadores, los cuales, se desbordan cada que transcurren 100us; cuando un temporizador se desborda, se incrementa un registro que va almacenando el valor del tiempo que va transcurriendo desde el instante que el temporizador se activó. Como la base de tiempo es 100us ó 0.1ms, el valor del tiempo se lleva en milisegundos multiplicados por 10; por ejemplo, si el valor acumulado en el registro es 63, el tiempo verdadero que ha transcurrido es 6.3ms.

Generación de Disparos: Este subsistema es el encargado de generar la secuencia de los pulsos de disparo de los SCR's cuando la cuenta del tiempo llega al valor límite determinado por el ángulo de retraso deseado por el usuario. Dependiendo del análisis de la ventana de conducción que se realiza en el bloque “Detección de Pulsos”, se genera el pulso para el SCR que rectifica el semiciclo positivo o el negativo. Si el pulso que se detectó corresponde al flanco de subida de la ventana de conducción, se debe disparar el semiciclo positivo porque el cruce por cero ocurrió desde el lado negativo hacia el positivo; y si dicho pulso corresponde al flanco de bajada de la ventana, se debe disparar el SCR del semiciclo negativo. Como ya se mencionó, los pulsos de disparo que se generan se mantienen hasta el instante donde se detecta un nuevo pulso que identifica un cruce.

Tres Pulsos Trifásico:

Figura 3.37. Diseño arquitectural aplicado al subsistema Tres Pulsos Trifásico.



Detección de pulsos: Se encarga de recibir los pulsos que corresponden a los cruces entre dos fases cualesquiera de la red de alimentación trifásica, mediante la atención de una subrutina de servicio de interrupción. Cuando un

cruce cualquiera es detectado se envía la señal de activación de los temporizadores del subsistema “Conteo de Tiempos”, la cual, los activa de forma intercalada; por lo tanto, cuando se detecta el primer cruce después de arrancar el sistema, la señal activa el primer temporizador, cuando se detecta el segundo cruce se activa el segundo, cuando es detectado el tercer cruce vuelve a activarse el primero, y así sucesivamente se mantienen ambos.

Conteo de Tiempos: Se encarga de llevar la cuenta de los tiempos correspondientes al ángulo de disparo digitado por el usuario. Contiene 2 temporizadores independientes que manejan una base de tiempo de 100us y que se activan de manera intercalada cuando se reciben los pulsos indicando cruces entre 2 fases. Cada que uno de los temporizadores se desborda, se incrementa un registro que almacena el tiempo que va transcurriendo desde que se activó el temporizador hasta que se llega a un valor límite predeterminado, el cual, corresponde al tiempo calculado para un ángulo de disparo particular. Si dicho valor límite se divide entre 10, se obtiene el valor del tiempo en ms; por ejemplo, si el valor límite es 36, el tiempo en ms es 3.6ms.

Lectura de Señales: Este subsistema es el encargado de leer el estado de las señales correspondientes a los cruces entre las fases y con base en éste, determinar cuáles se cruzaron y en qué semiciclo lo hicieron; debido a que para esta topología solo interesan los cruces en el semiciclo positivo para generar los pulsos de disparo de los SCR's, pero a partir de los cruces en el semiciclo negativo se finalizan los mismos, es necesario detectar de manera particular cada cruce. Por lo tanto, este bloque implementa una función para leer las señales de los puertos, comparar sus estados (alto o bajo) y dependiendo de los mismos, asignar un número al cruce para identificarlo.

La siguiente tabla muestra el cruce identificado y las fases que se cruzan a partir del estado de señales verificado:

Tabla 3.4. Fases que se cruzan de acuerdo al estado de las señales que se leen.

Cruces	Estado Señales			Fases que se Cruzan	Semiciclo
	AB	CA	BC		
1	1	0	1	A-B	Positivo
2	1	0	0	B-C	Negativo
3	1	1	0	C-A	Positivo
4	0	1	0	A-B	Negativo
5	0	1	1	B-C	Positivo
6	0	0	1	C-A	Negativo

De dicha tabla, se concluye que los cruces 1, 3 y 5 son los que se utilizan para disparar los SCR's y los cruces 2, 4 y 6 para apagar los pulsos generados.

Generación de Disparos: Este bloque es el encargado de ubicarse al interior de la secuencia de disparos predeterminada para la topología y generar los disparos de los SCR's o apagar el que se encuentra encendido dependiendo de la identificación de los cruces que se hizo en el subsistema "Lectura de Señales". Cuando el conteo del tiempo correspondiente al ángulo de disparo se termina, se debe disparar el SCR que corresponde de acuerdo a la secuencia, de la siguiente manera:

Tabla 3.5. Secuencia de disparos de acuerdo a los cruces detectados.

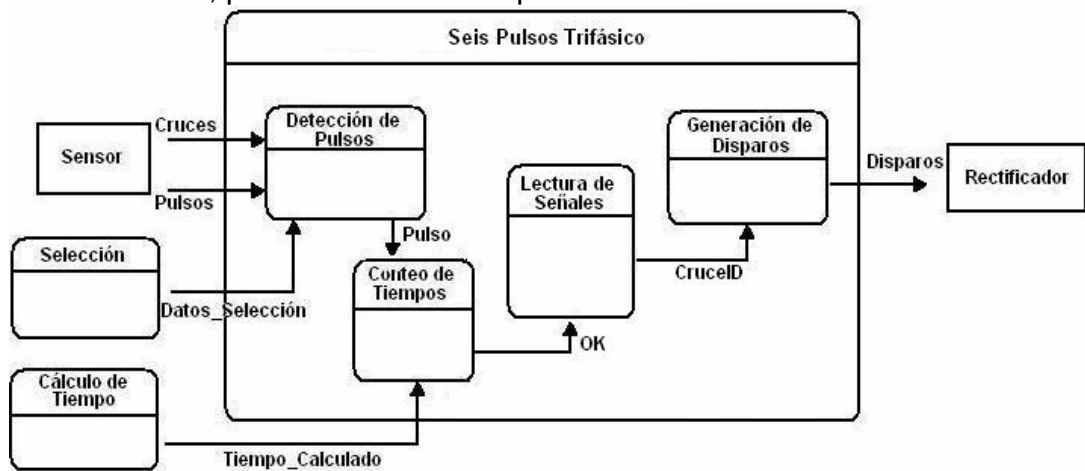
Cruces	Fases que se cruzan	Fase máxima	SCR a disparar	SCR a apagar
1	A-B	A	1	-----
2	B-C (-)	A	-----	2
3	C-A	C	3	-----
4	A-B (-)	C	-----	1
5	B-C	B	2	-----
6	C-A (-)	B	-----	3

De tal modo, que la secuencia de disparo es: Tiristor 1, que es el que está conectado a la fase A, cuando dicha fase es la que tiene mayor amplitud. Tiristor 3, cuando la fase C tiene la amplitud máxima; y finalmente, tiristor 2 cuando la fase B tiene amplitud mayor a las demás. También puede verse que en algunos cruces no se dispara ningún SCR si no que por el contrario, se desactiva el que está encendido.

Lo anterior se realiza de la siguiente manera: Se recibe una señal donde se indica que se ha terminado el conteo del tiempo requerido para un ángulo de retraso y que además, se han identificado los cruces entre fases; se verifica cuál es el cruce para el cual se ha realizado el conteo del tiempo y se realiza una de las acciones descritas en la tabla de acuerdo al número del cruce.

Seis Pulsos Trifásico:

Figura 3.38. Diseño arquitectural en el quinto nivel aplicado al Subsistema Seis Pulsos Trifásico, perteneciente al bloque Rectificadores.



Detección de pulsos: Su función principal es detectar los pulsos que representan los cruces entre 2 de las fases de la red de alimentación trifásica mediante la ejecución de una subrutina de servicio de interrupciones. Además, debe enviar una señal al subsistema “Conteo de Tiempos” para activar alguno de los tres temporizadores disponibles para tal fin. Dicha señal depende de un orden que se le da a los cruces detectados tomando como referencia al primer pulso que se detecta inmediatamente después de haber encendido el sistema; de tal manera que cuando se recibe el primer pulso, se debe indicar que el temporizador a encender es el 1, cuando se detecta el segundo corresponde al temporizador 2 y cuando llega el tercero, se indica que se debe encender el temporizador 3. Al recibir el cuarto pulso, se indica que debe volver a encenderse el temporizador 1 y así sucesivamente.

Conteo de tiempos: Es similar a los subsistemas de “Conteo de Tiempos” ubicados en los bloques anteriormente descritos, con la diferencia que tiene 3 temporizadores en lugar de 2. Su funcionamiento es el mismo, ya que cada que se desborda un temporizador cuya base de tiempo es 100us, se incrementa un registro que almacena el tiempo que se va contando desde que se activa dicho temporizador hasta que se alcanza el valor límite predeterminado.

Lectura de Señales: Este subsistema se encarga de realizar la lectura de los estados de las señales que representan los cruces entre dos fases, y de acuerdo a éstas, determinar cuáles se cruzaron y en qué semiciclo lo hicieron. Esto debe hacerse con el objetivo de permitir al subsistema “Generación de Disparos” generar la secuencia de disparos correcta para el control de la topología. En la tabla 4.4 se puede visualizar la identificación de los cruces con respecto a las fases que están involucradas y al semiciclo donde ocurrió el cruce.

Se realiza de la misma manera que en el subsistema anterior; se leen los puertos, se pregunta si el estado de cada señal es alto o bajo, se verifica que

se presente una combinación de estados en especial y si esto ocurre, se identifica cada cruce con un número.

Generación de disparos: En este subsistema se generan los disparos de los SCR's de acuerdo a la ubicación del sistema en la secuencia de disparos predeterminada para la topología. Para esto, es necesario realizar la identificación de los cruces a través del subsistema "Lectura de Señales", ya que dependiendo del instante que se detecte donde ocurre el cruce, se dispara una pareja de SCR's y se apaga otra. Por ejemplo, si el cruce detectado es el que corresponde a las fases B-C en el semiciclo negativo, se deben disparar los SCR's 1-2 que conectan entre sí las fases A-B, y se deben apagar los SCR's 3-4 que tenían a las fases C-A conectadas entre ellas.

En la siguiente tabla se resume la secuencia de encendido y apagado de los SCR's dependiendo de la identificación del cruce:

Tabla 3.6. Secuencia de disparos de acuerdo a los cruces detectados.

Cruces	Fases que se cruzan	Fases conectadas	SRC's a disparar	SCR's a apagar
1	A-B	A-C	6-1	3-4
2	B-C	A-B	1-2	4-5
3	C-A	C-B	2-3	5-6
4	A-B	C-A	3-4	6-1
5	B-C	B-A	4-5	1-2
6	C-A	B-C	5-6	2-3

Cabe anotar que las fases que deben conectarse son aquellas que tienen la amplitud absoluta máxima en el instante donde se presenta el cruce. El encendido de los SCR's se realiza después de transcurrido el tiempo correspondiente al ángulo de disparo digitado, mientras que el apagado se realiza en el instante exacto donde ocurre un cruce entre fases.

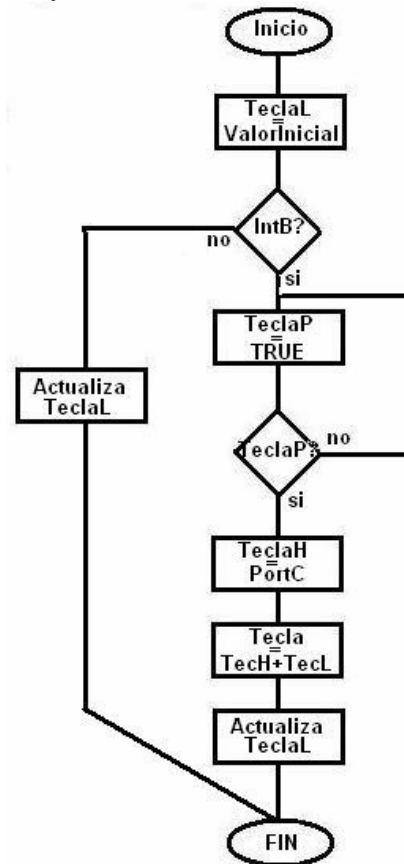
3.3.2. Diagramas de flujo. A continuación, se mostrarán los diagramas de flujo de las funciones que se ejecutan a más bajo nivel en los bloques ya mencionados.

- **Configuración.** Como ya se mencionó en el diseño arquitectural, el subsistema de configuración tiene asociados otros bloques de más bajo nivel que se encargan de ejecutar las funciones secundarias que permiten el cumplimiento de la función principal, que para este caso es la configuración del sistema.

Los siguientes diagramas de flujo ilustran tales funciones:

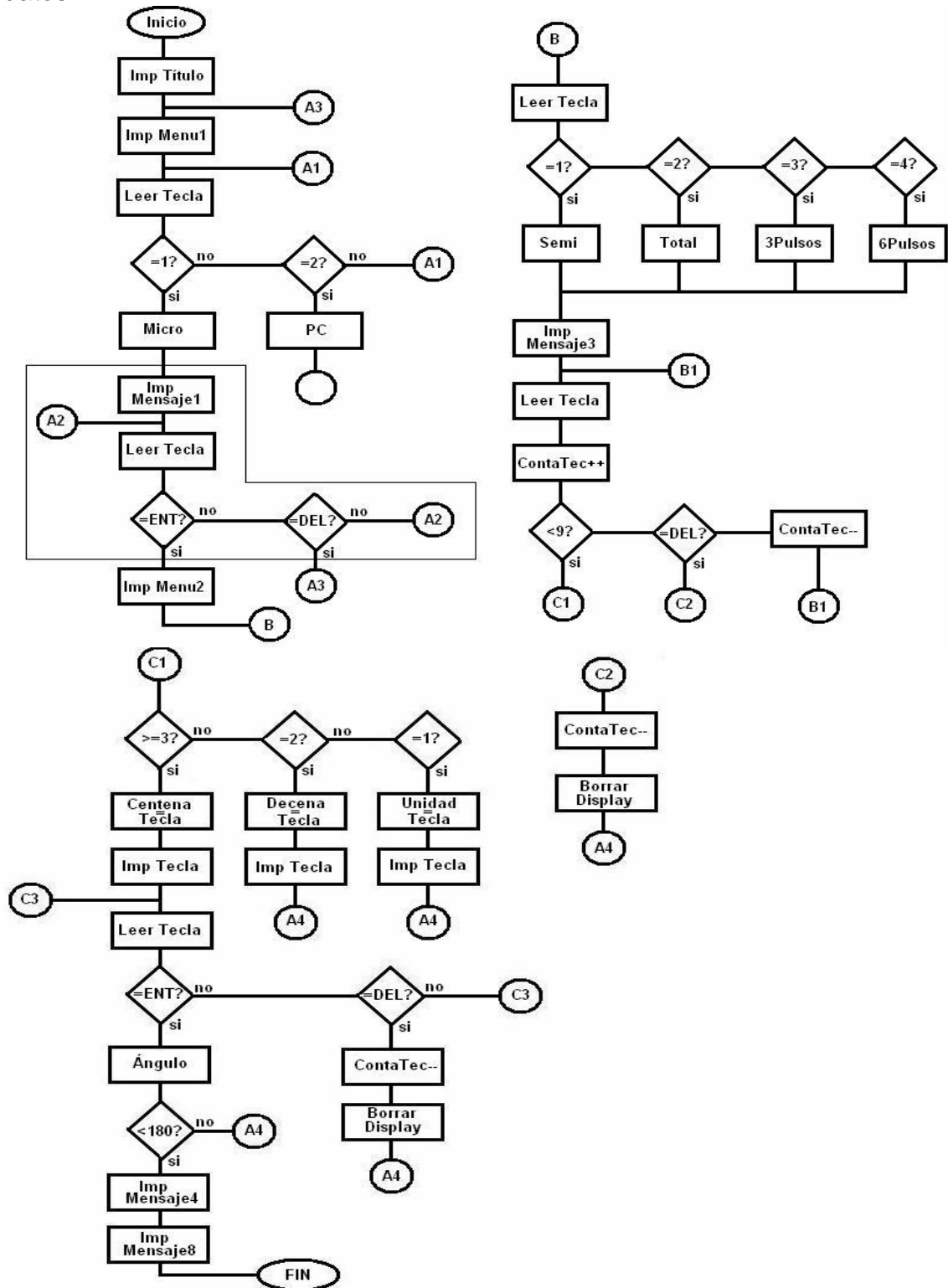
Lectura:

Figura 3.39. Diagrama de flujo de la función de lectura.



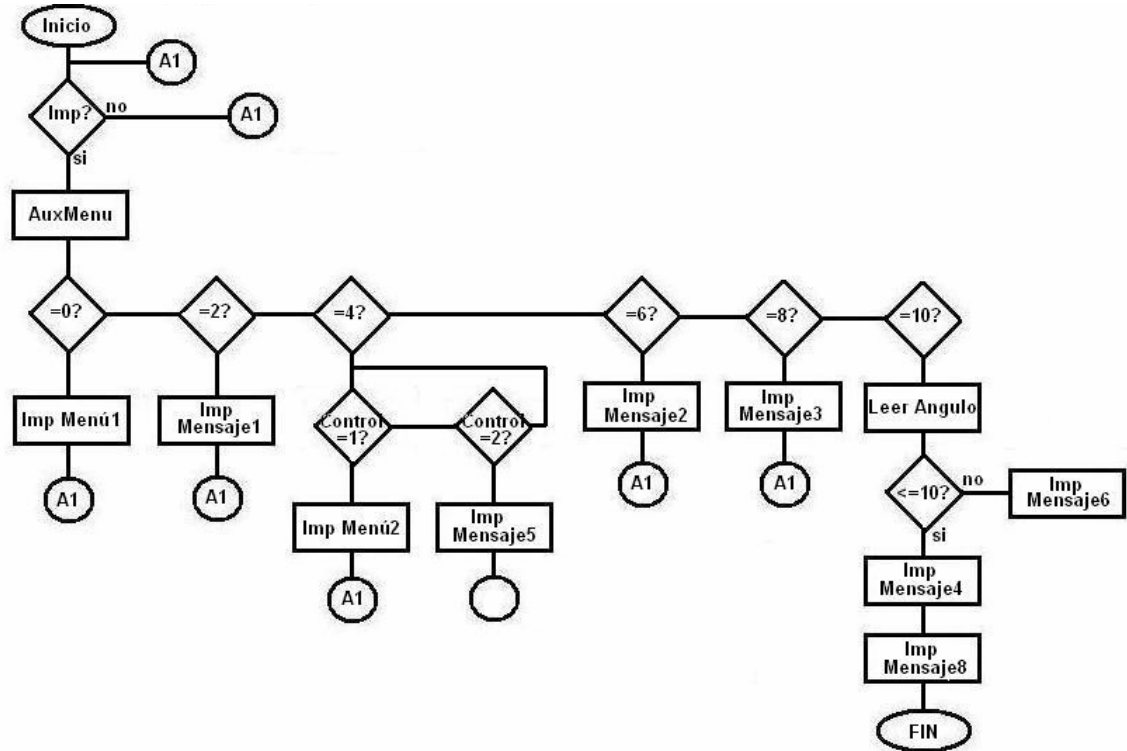
Distribución de datos:

Figura 3.40. Diagrama de flujo que implementa la función de distribución de datos.



Control de Visualización:

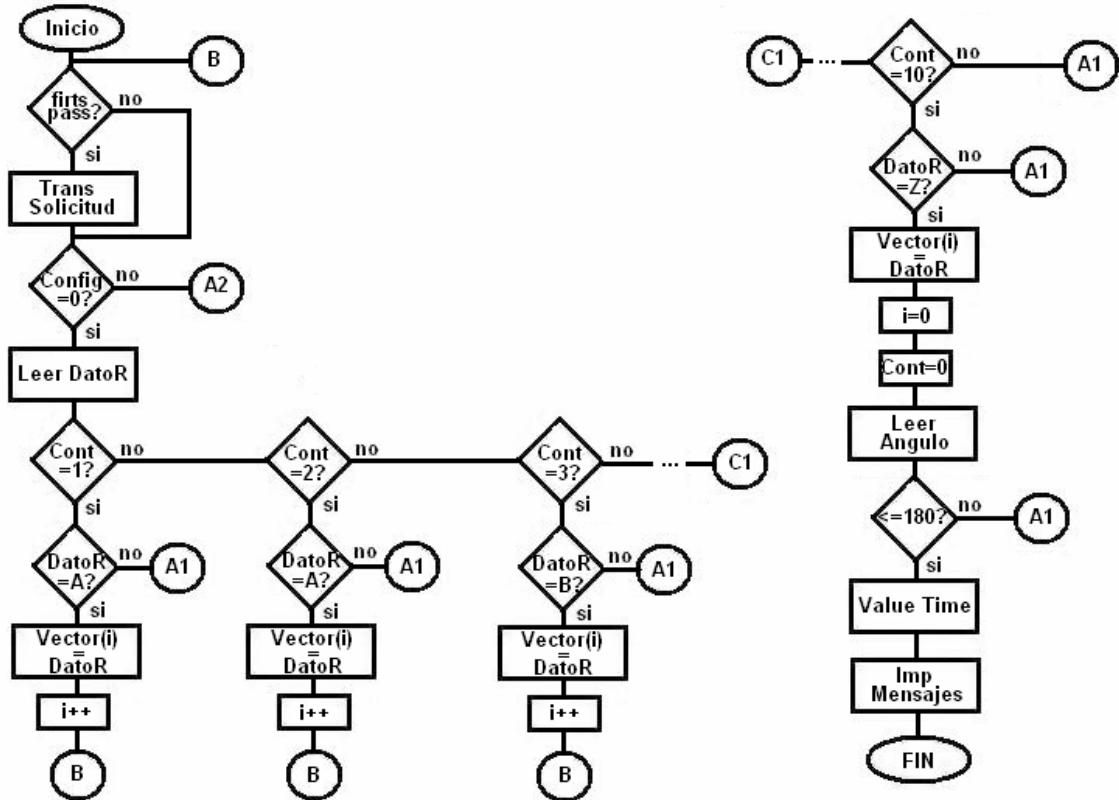
Figura 3.41. Diagrama de flujo para implementar la función de control de la visualización.



Cabe anotar que aunque parece que hay procedimientos que se ejecutan en la función de Distribución de Datos y de Control de Visualización, en realidad lo que ocurre es que la primera le da la orden a la segunda para que ésta lo ejecute. Por ejemplo, cuando en el diagrama de flujo de Distribución de Datos aparece que se debe imprimir el “Menú1”, lo que en realidad ocurre en esta función es que se le da el valor a la variable “AuxMenu” para que cuando se ejecute la función de Control de Visualización, ésta lo imprima.

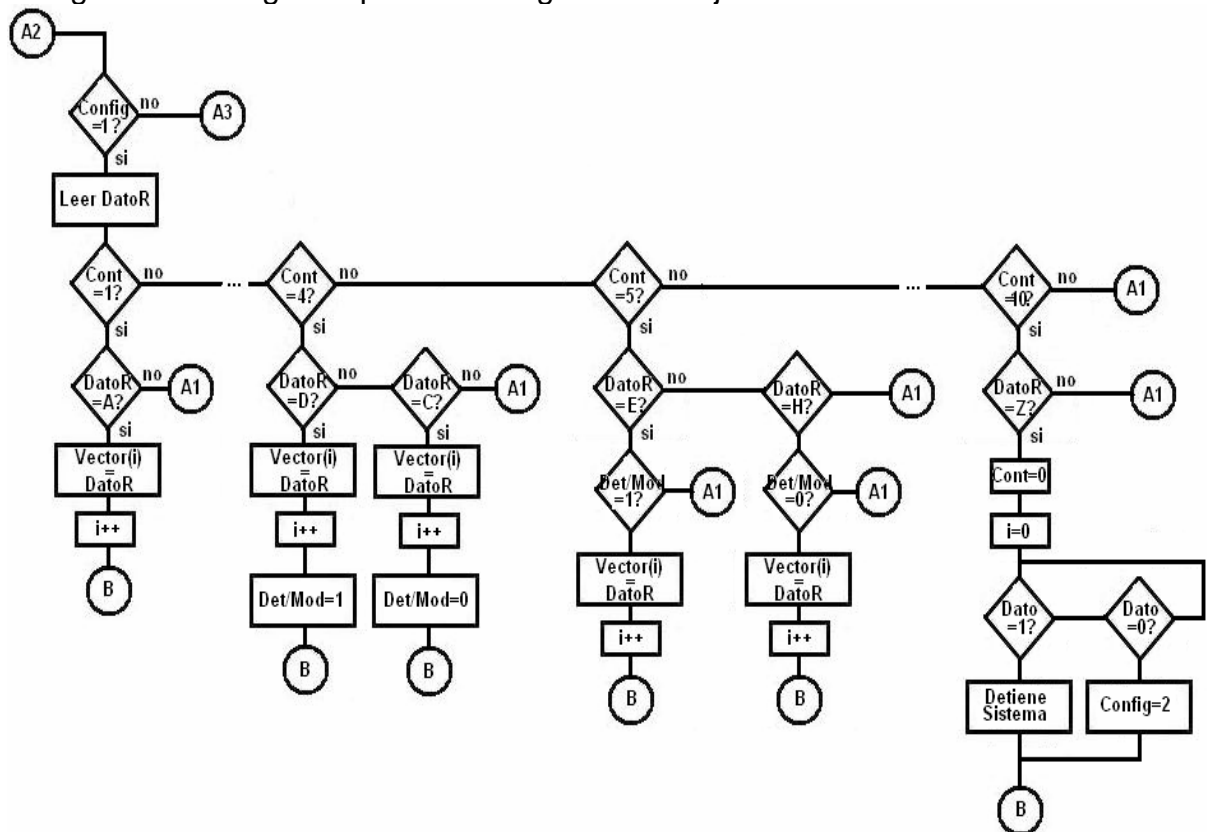
- **Comunicación.** En este subsistema también se tienen asociados bloques de menor nivel que ejecutan funciones específicas, que a su vez, permiten la ejecución de la función principal que es establecer una comunicación entre el sistema y la interfaz gráfica de monitoreo y mando que se encuentra en el PC.

Figura 3.42. Primera parte del Diagrama de flujo de la función de comunicación a un nivel no tan bajo.



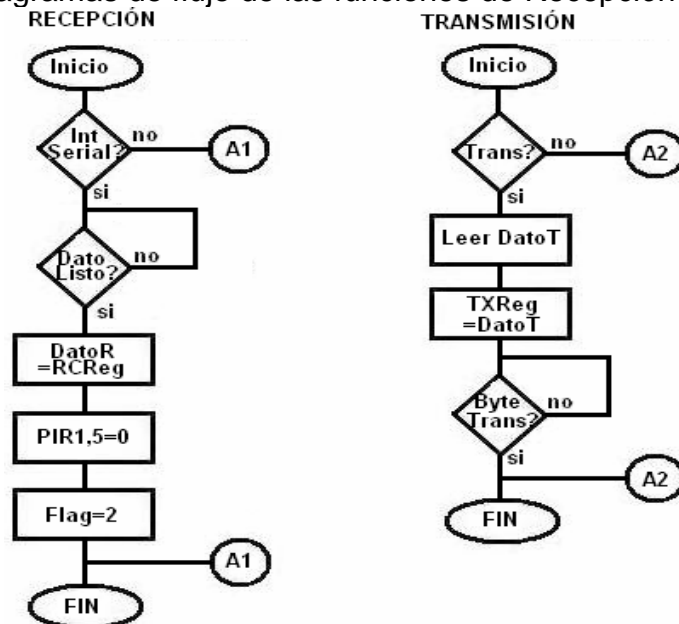
El símbolo A2 indica que el diagrama de flujo continúa cuando el valor de la variable “Config” es diferente de cero. Dicha variable es la que indica que los datos recibidos corresponden a una trama en especial. Por ejemplo, cuando “Config” en cero, la trama esperada es: “AABT□A□□□Z”. Si “Config” vale uno, pueden recibirse dos tramas: “AABDETENXZ” o “AABCHANGEZ”, las cuales, son para detener el sistema o para modificar datos en línea, respectivamente. Y cuando “Config” contiene almacenado el valor dos, se esperan las tramas: “AABAMASXXZ”, “AABAMENOSZ” o “AABENTERXZ”, las cuales, se utilizan de la siguiente manera: la primera es para incrementar el valor del ángulo de disparo, la segunda es para decrementarlo y la última es para indicar que se terminó al modificación de datos en línea.

Figura 3.43. Segunda parte del diagrama de flujo de la función de comunicación.



Recepción y Transmisión:

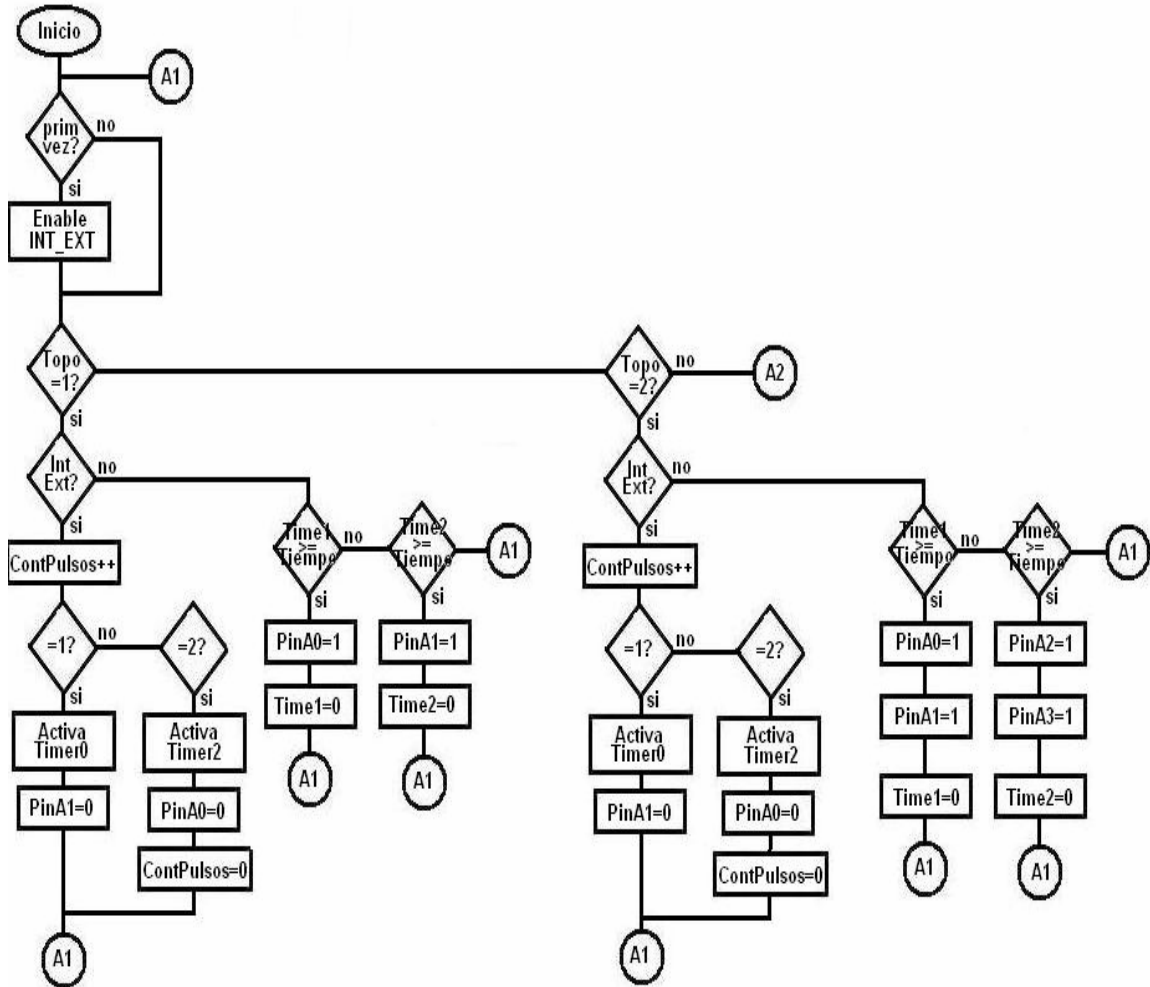
Figura 3.44. Diagramas de flujo de las funciones de Recepción y Transmisión.



- **Control.** En el subsistema de control se encuentran las funciones que permiten controlar el funcionamiento adecuado del sistema para cada una de las topologías que pueden ejecutarse.

En los siguientes diagramas de flujo se ilustran tales funciones:

Figura 3.45. Diagrama de flujo para el control de las topologías Monofásicas, Semicontrolado y Totalmente Controlado.



La primera parte del diagrama de flujo se encarga de la selección de la función a implementar dependiendo de la topología escogida; corresponde al subsistema de “Selección” descrito en el diseño arquitectural.

El salto marcado como “A2” se dirige hacia la función encargada de controlar el Rectificador Trifásico de 3 Pulsos, mientras que el salto “A3”, lo hace hacia la función que se encarga de manejar la topología del Rectificador Trifásico de 6 Pulsos.

Figura 3.46. Diagrama de flujo para el control del Rectificador de 3 Pulsos.

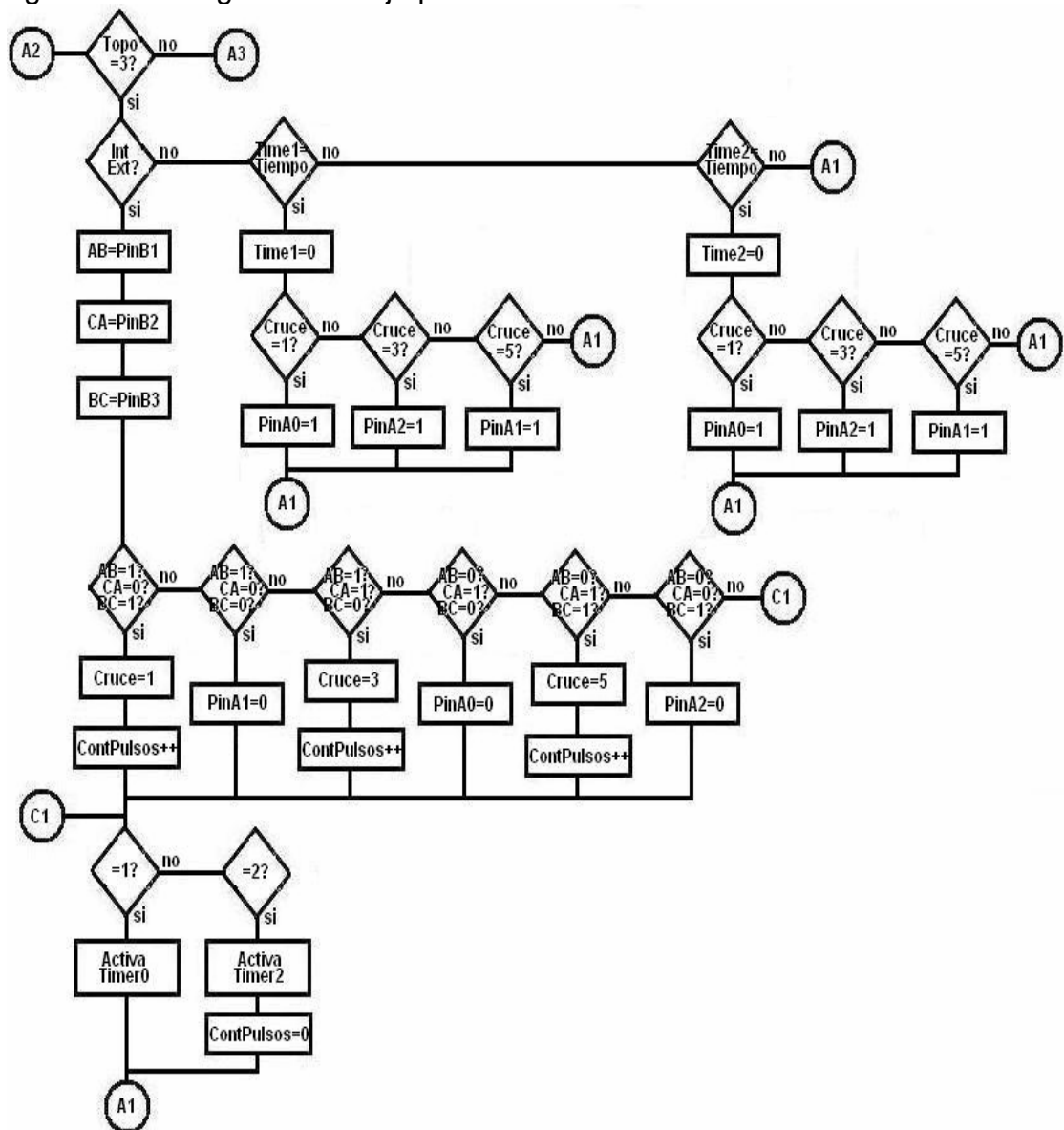
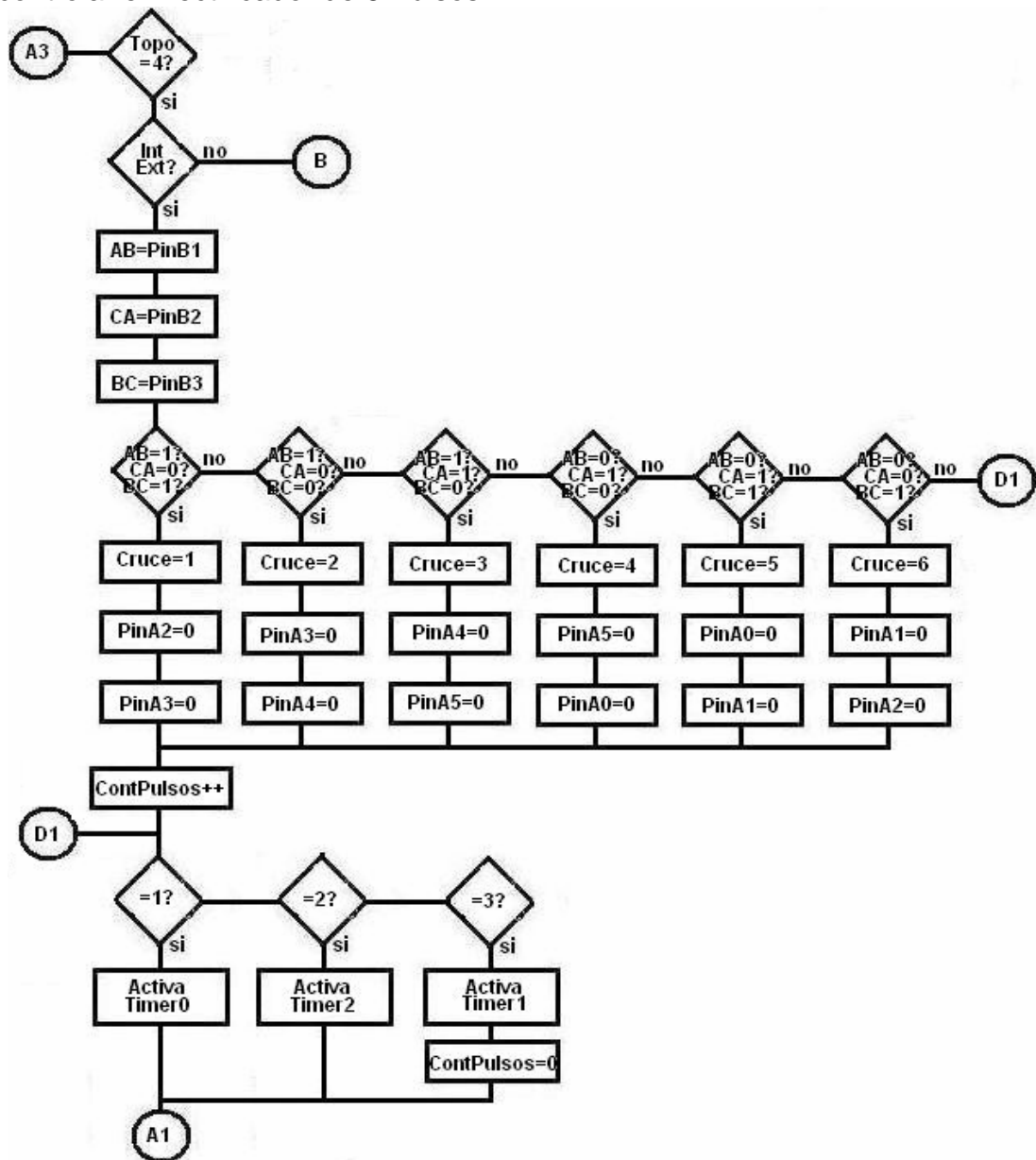
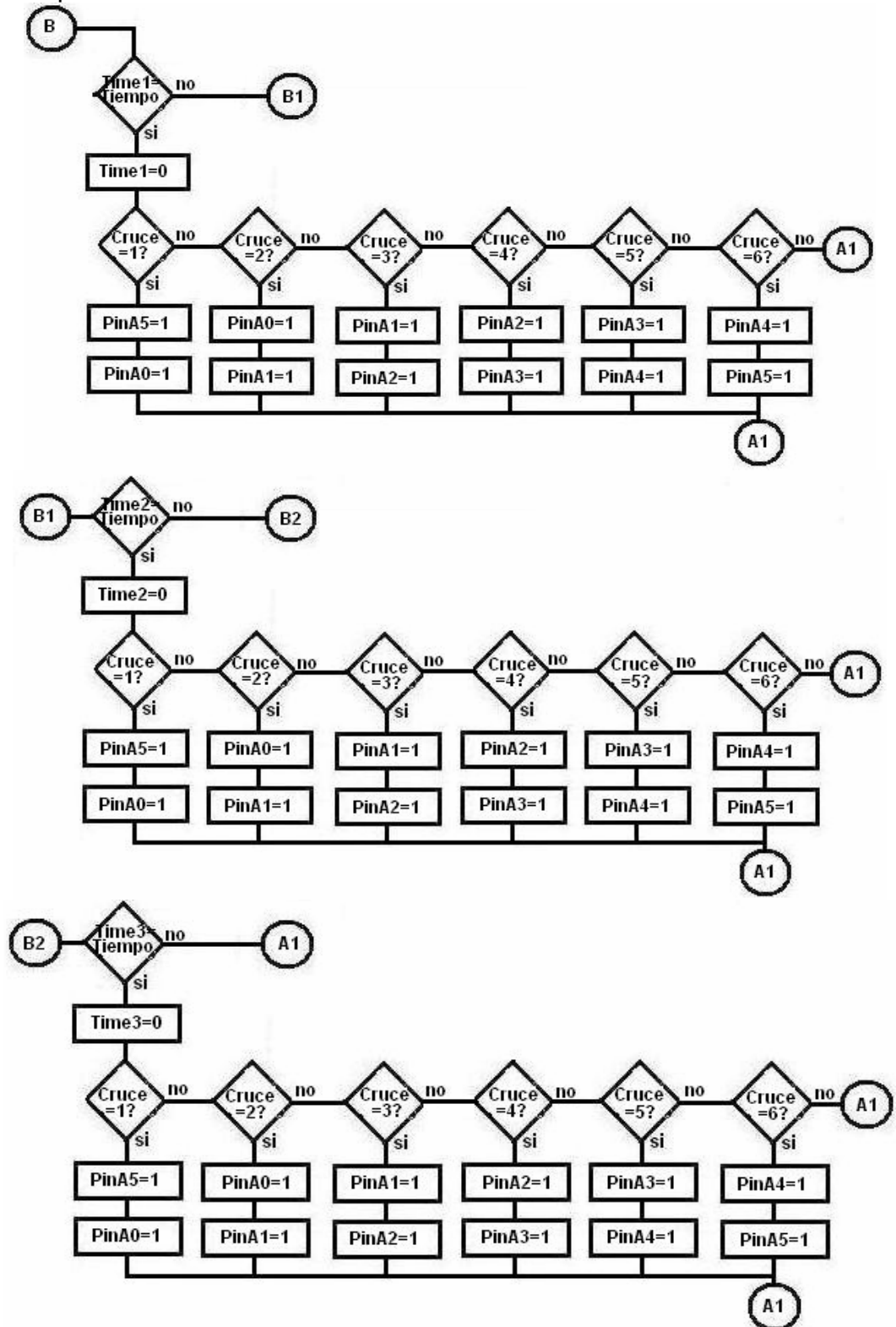


Figura 3.47. Diagrama de flujo de la primera parte de la función encargada de controlar el Rectificador de 6 Pulsos.



El salto "B" se dirige hacia la función encargada de generar los pulsos de disparo de los SCR's a partir de la identificación de los cruces realizada en esta función.

Figura 3.48. Diagrama de flujo de la función que genera los disparos de los SCR's para el Rectificador de 6 Pulsos.



4. RESULTADOS OBTENIDOS

El Sistema de Entrenamiento en Rectificadores Controlados se desarrolló en varias fases, a partir de las cuales se produjeron diferentes resultados.

La primera fue la fase de Investigación, en la cual, se examinó y se comprendió de manera clara la teoría existente acerca del funcionamiento de los Rectificadores Controlados en sus diferentes topologías. Dicho resultado puede evidenciarse en el Capítulo 1 de este documento, donde se explica con las palabras del autor el funcionamiento de cada rectificador de una forma clara y concisa; además, la explicación se apoya en circuitos simulados y en una tabla que resume una secuencia de disparo (Tabla 1.1, página 40).

La segunda fase fue Simulación, donde se confrontó la teoría estudiada y aprendida con el comportamiento de circuitos muy cercanos a la realidad construidos en el Software de simulación Pspice 10, con el fin de comprobar el nivel de comprensión que se obtuvo. Se realizaron simulaciones de cada rectificador controlado y se visualizaron las diferentes formas de onda de voltaje y corriente que se producen para diferentes ángulos de disparo.

Cabe anotar que las simulaciones obtuvieron resultados muy satisfactorios debido a que las formas de onda que se generaron fueron muy similares a las formas de onda que según la teoría deben producirse.

Las siguientes figuras muestran específicamente los circuitos que se simularon:

Figura 4.1. Circuito Rectificador Controlado Monofásico (igual a la figura 1.1).

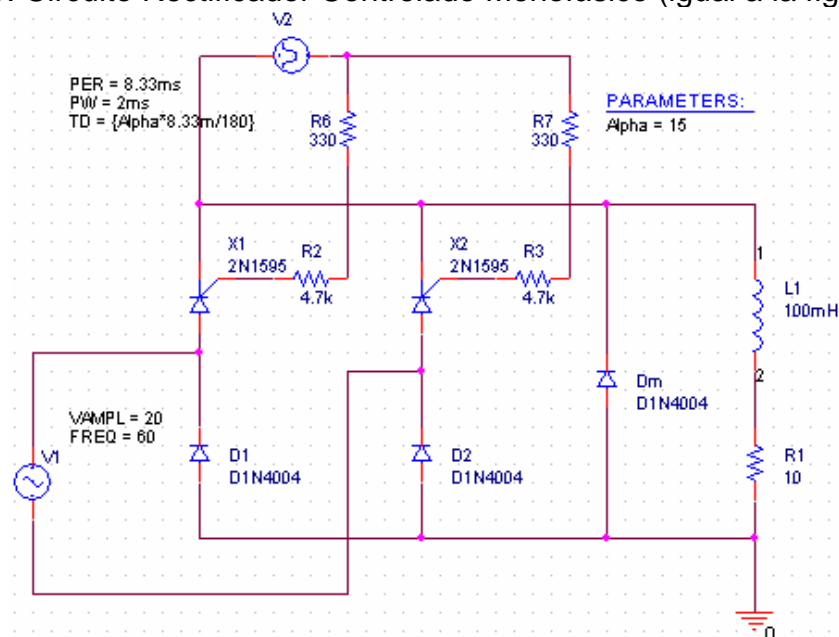


Figura 4.2. Circuito Rectificador Monofásico Totalmente controlado (igual a la figura 1.7).

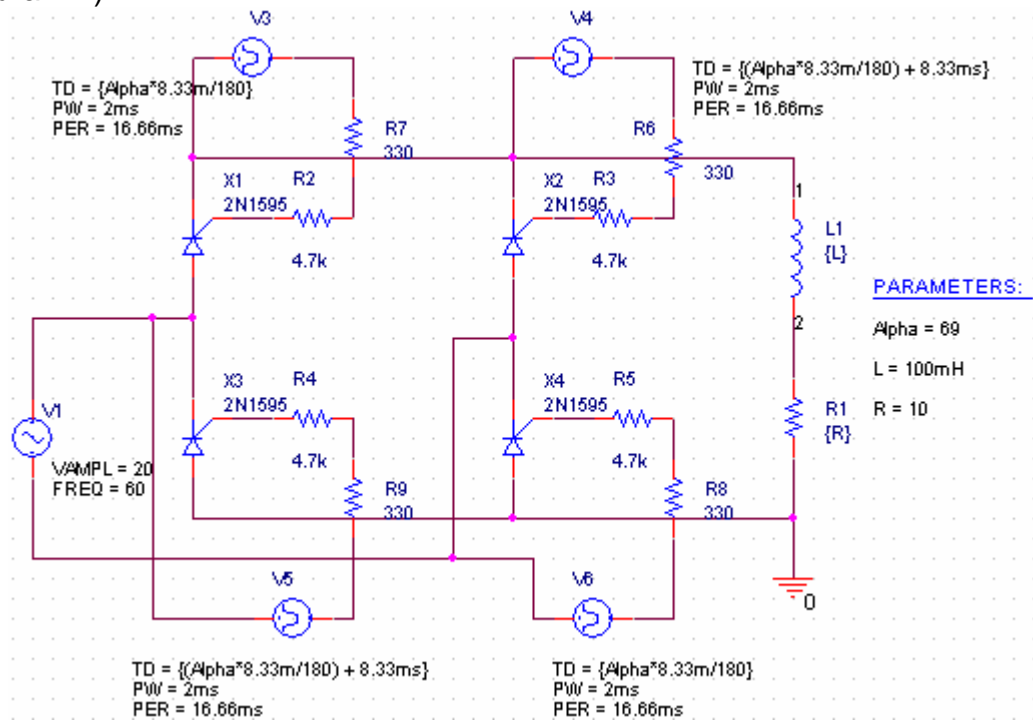


Figura 4.3. Rectificador Controlado Trifásico de media onda o Rectificador de 3 pulsos. (igual a la figura 1.11).

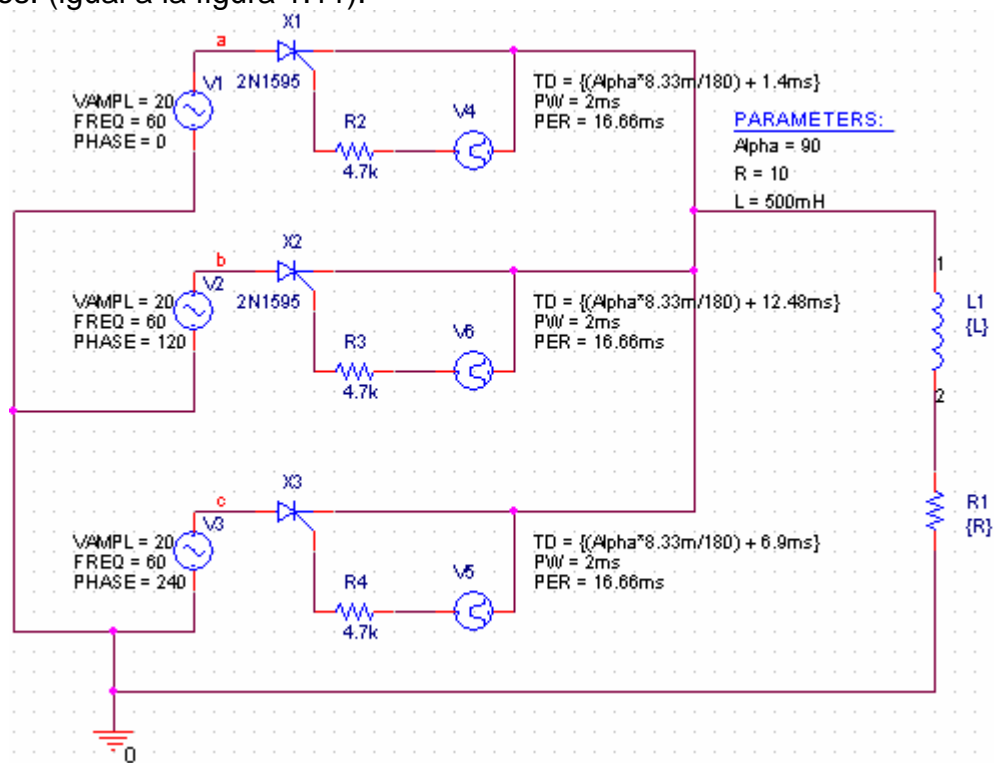
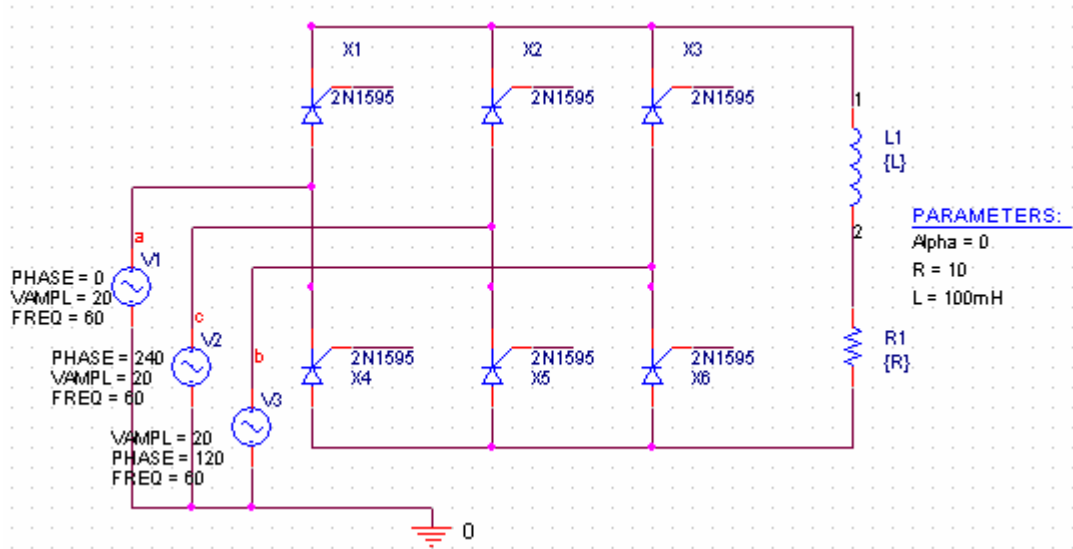


Figura 4.4. Circuito Rectificador Controlado de onda completa o Rectificador de 6 pulsos (igual a la figura 1.16).



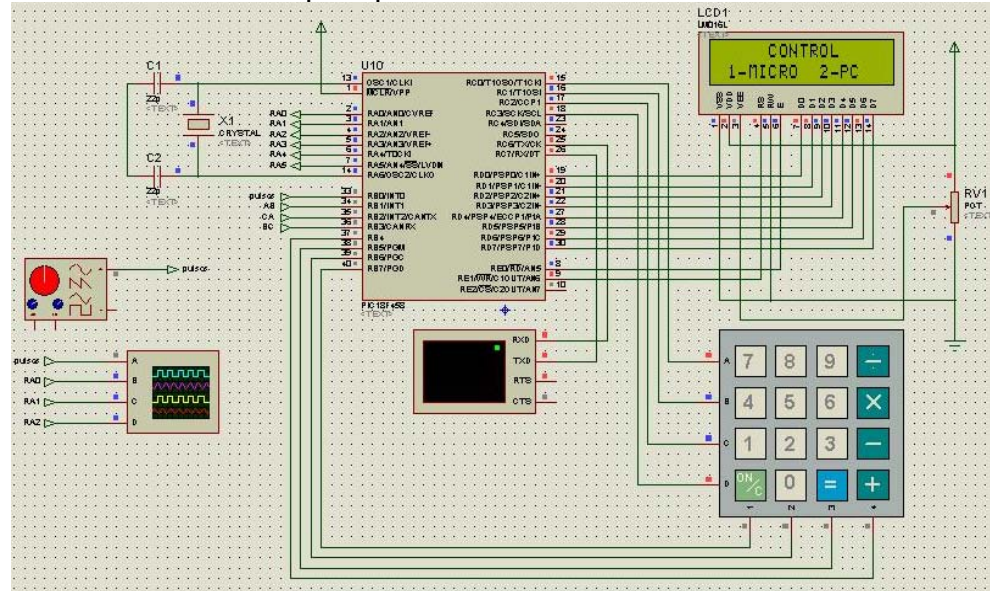
Las formas de onda que se generan en cada uno de estos circuitos fueron mostradas en el capítulo 1, y se encuentran a partir de la figura 1.5 (página 25) hasta la figura 1.21 (exceptuando a la figura 1.14 y las figuras que corresponden a los circuitos, las cuales ya se mencionaron).

La tercera fase correspondió al Diseño de los Circuitos que permiten el funcionamiento adecuado del Sistema de Entrenamiento en Rectificadores Controlados; dichos circuitos son: Los detectores de cruces entre fases y por cero, el circuito de control, los drivers para disparar los SCR's y la plataforma de conexión de cada uno de los rectificadores estudiados. La sección 3.2 (capítulo 3, inciso 2) que tiene como título *Etapas Hardware* explica e ilustra los circuitos obtenidos, incluyendo los esquemáticos, los diagramas de ubicación de elementos en las tarjetas y los diseños finales de cada circuito. Adicionalmente, se realizó el diseño de una plataforma para realizar las conexiones del sistema, la cual, se muestra en la figura 3.18 (página 83) y cuyas vistas, planos y detalles pueden observarse también en las figuras posteriores a ésta (desde la 3.19 hasta la 3.24).

La cuarta fase fue el Desarrollo del Software de la etapa de Control, la cual, se describe paso por paso en la sección 3.3 (capítulo 3, inciso 3). En dicha sección se aplica la metodología de diseño secuencial o "Bottom-Up" al sistema, se definen las entradas y salidas para cada módulo y se desarrolla de manera independiente la lógica interna de cada uno; adicionalmente, se adicionan los diagramas de flujo de cada función, los cuales, pueden verse a partir de la figura 3.39 (página 124). Cabe anotar que esta fase es la que más se detalla en el presente documento porque representa la mayor parte del trabajo realizado.

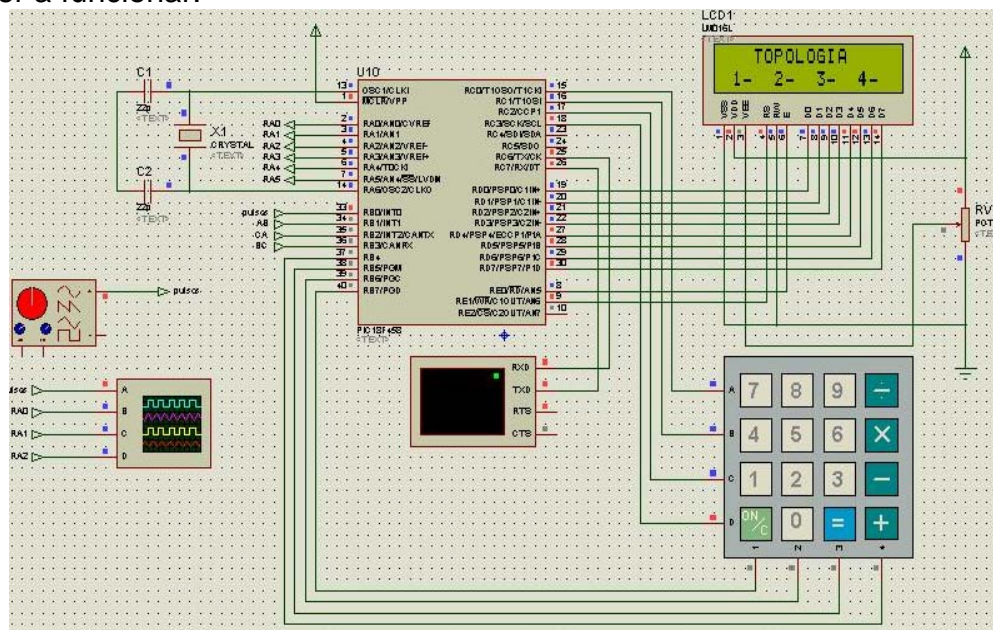
Como resultados del software realizado pueden considerarse las siguientes figuras, las cuales ilustran el funcionamiento del sistema de control, a medida que el usuario interactúa con éste:

Figura 4.5. Primer menú que aparece cuando se inicia el sistema.



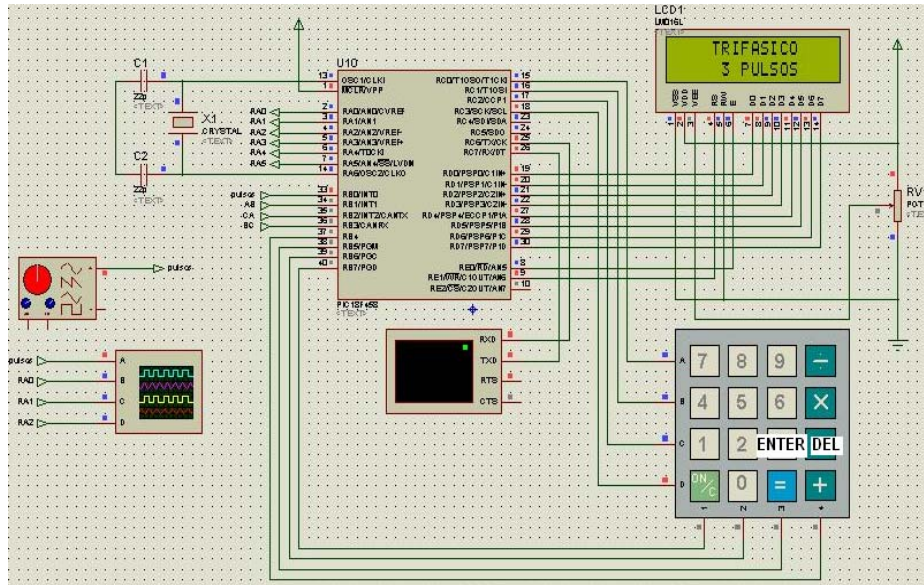
En este momento es cuando el usuario decide interactuar con el sistema desde el circuito de control o desde un PC. Si escoge la opción 1 (Micro) se desplegará el siguiente menú en donde deberá escoger la topología que desea controlar.

Figura 4.6. Menú 2, el cual, permite seleccionar la topología que se desea poner a funcionar.



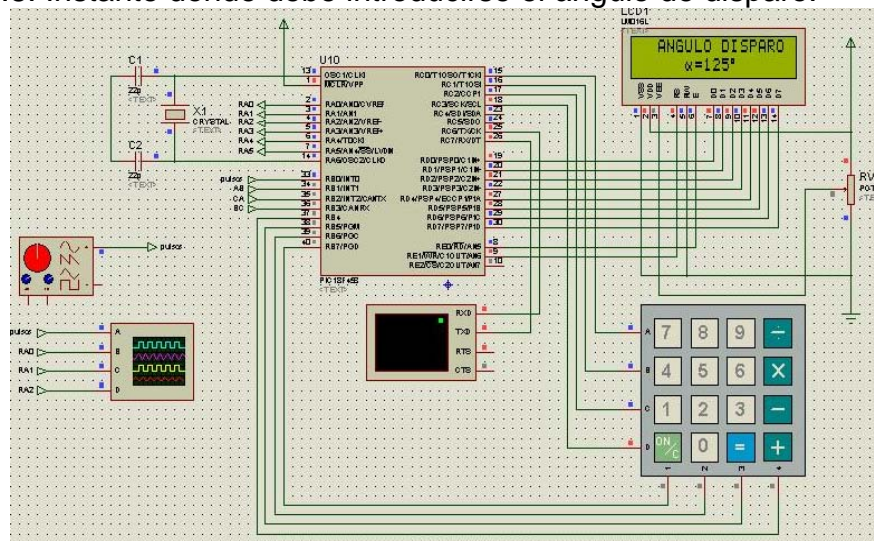
La opción 1 se refiere al Rectificador semicontrolado monofásico, la opción 2 al Rectificador totalmente controlado Monofásico, la número 3 al Rectificador de 3 pulsos y la número 4 al Rectificador de 6 pulsos. Cuando se escoge cualquiera de ellas, el sistema pregunta si esa opción es la deseada o no, por lo tanto se debe confirmar o des-hacer la opción seleccionada; para confirmar se presiona la tecla ENTER y para des-hacer la tecla DEL.

Figura 4.7. Instante en el cual se debe confirmar o des-hacer la opción escogida.



Si se confirma la topología seleccionada, el siguiente paso es digitar mediante el teclado el ángulo de disparo que se desea obtener. Dicho valor debe estar entre 0 y 180°, de lo contrario, el sistema no permitirá su ingreso. Por otro lado, si se des-hace la opción escogida el sistema regresa al instante mostrado en la figura 4.6.

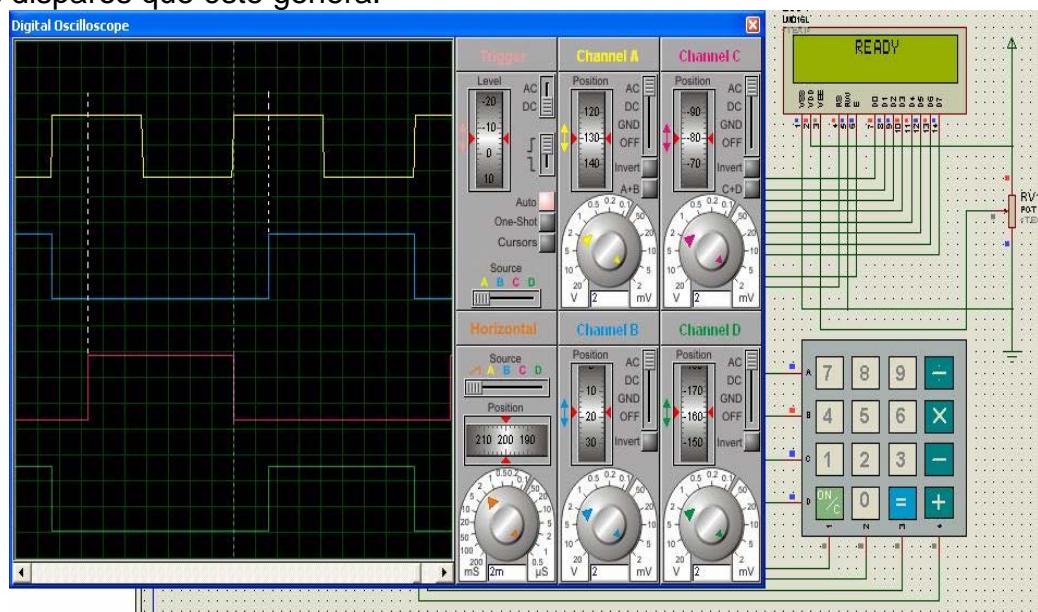
Figura 4.8. Instante donde debe introducirse el ángulo de disparo.



Cuando se introduce un ángulo de disparo cualquiera y se confirma presionando la tecla ENTER, el sistema de control inicia su funcionamiento. En otras palabras, el sistema comienza a detectar las señales que vienen desde el circuito detector de cruces y comienza a generar los disparos de los SCR's del puente rectificador seleccionado con el retraso especificado y sincronizados con la red eléctrica.

En la siguiente figura pueden visualizarse las formas de onda de los pulsos que detectan los cruces por cero (porque se está simulando un rectificador monofásico) y las formas de onda de los disparos mencionados:

Figura 4.9. Formas de onda de los pulsos que recibe el microcontrolador y de los disparos que éste genera.



La señal amarilla corresponde a los pulsos que recibe el microcontrolador para indicarle los instantes exactos de los cruces por cero. La señal azul corresponde a los disparos que van hacia una pareja de SCR's del puente completo monofásico y la señal roja, por ende, corresponde a los disparos que van hacia la otra pareja. La señal verde es la repetición de la señal azul; en otras palabras, la señal azul va a un SCR y la señal verde va al otro.

Para incrementar o disminuir el ángulo de disparo en línea, se debe primero presionar la tecla CHAN para habilitar la función y luego, presionar la tecla INC para incrementar o DEC para disminuir; el paso de un ángulo a otro se realiza de a 1°.

Las siguientes figuras ilustran el incremento o el decremento del ángulo:

Figura 4.10. Formas de onda después de incrementar en línea el ángulo de disparo.

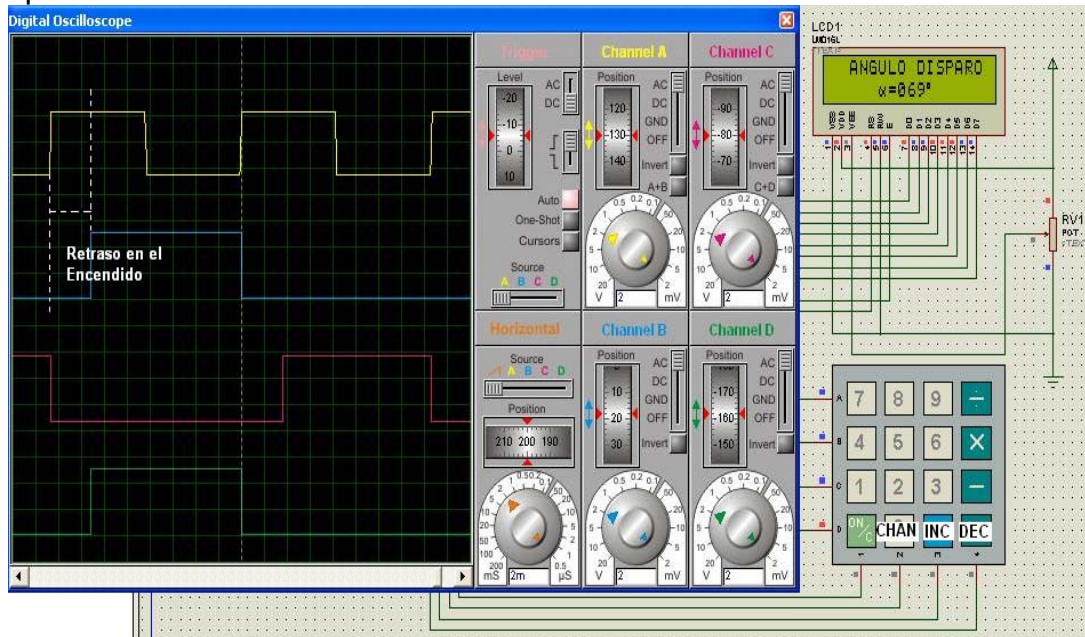
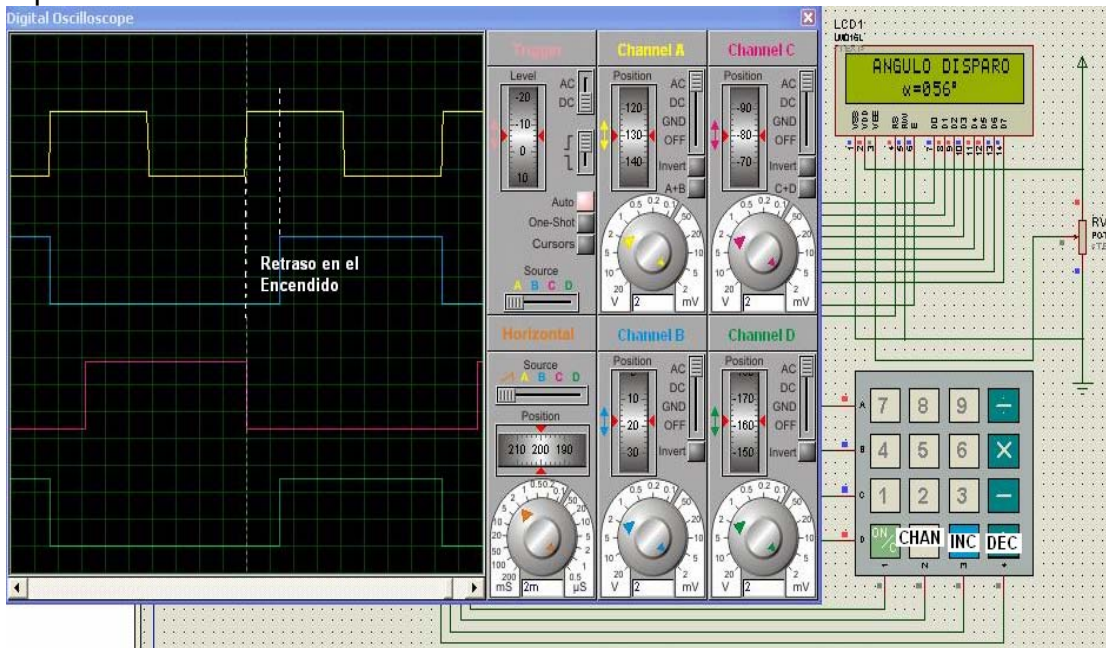
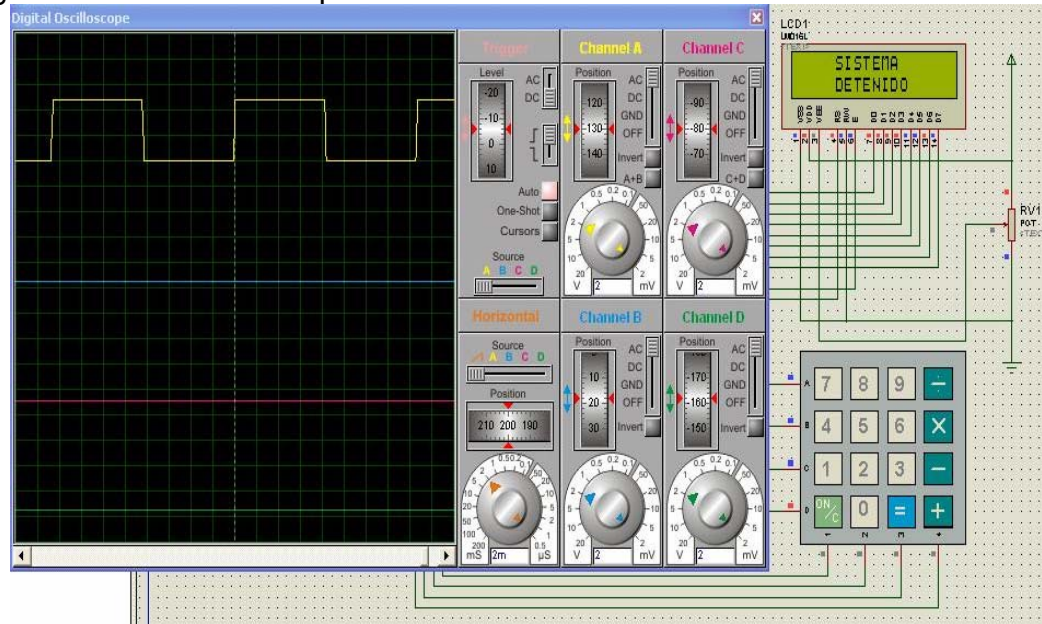


Figura 4.11. Formas de onda resultantes después de disminuir el ángulo de disparo en línea.



Y para detener el sistema, se presiona la tecla DET en cualquier instante y éste automáticamente deja de generar los disparos que se han mostrado en las tres figuras anteriores. La siguiente figura muestra lo que ocurre cuando dicha tecla es presionada:

Figura 4.12. Sistema después de haber sido detenido.



La quinta y última fase corresponde a la construcción física de los circuitos que se diseñaron en la sección 3.1 y el montaje de los mismos en un banco de proyectos; adicionalmente, se tiene instalado en el banco de proyectos un módulo de alimentación que se encarga de distribuir las tensiones de DC que necesitan los circuitos del sistema y las señales de AC que van a la etapa de potencia y a los sensores.

Las siguientes figuras muestran las tarjetas construidas y el módulo de alimentación del sistema.

Figura 4.13. Módulo de alimentación.



Cada una de las etapas o módulos mencionados se refieren a las tarjetas que componen el hardware del sistema, cuyo proceso de diseño ya se ha descrito.

Figura 4.14. Circuito de control.



Figura 4.15. Circuito detector de cruces entre fases.



Figura 4.16. Circuito detector de cruces por cero.



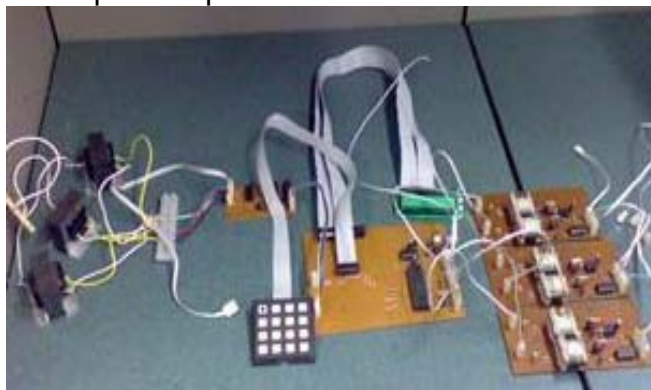
Figura 4.17. Transformadores que acondicionan las señales de AC.



Figura 4.18. Circuito driver para el disparo de los SCR's.



Figura 4.19. Circuitos que componen el hardware del sistema.



5. CONCLUSIONES

- Se logró comprender completamente el funcionamiento de los Rectificadores Controlados con SCR's en todas sus topologías, debido a que se realizó una investigación seria en cuanto al principio de funcionamiento de cada una de ellas, se simuló el comportamiento de cada circuito para compararlo con el comportamiento ideal, con base en los resultados obtenidos se desarrollaron estrategias de control para cada topología y por último, se implementaron los circuitos adicionales que se requieren para el funcionamiento.
- Uno de los principales problemas que se presenta al implementar un sistema dividido en módulos es el acople de las diferentes etapas que lo componen. Para solucionar esto, es necesario realizar varios ajustes en las conexiones de las mismas, tales como: Implementar filtros pasabajo RC de primer orden tanto en las entradas como en las salidas de cada circuito, con el objetivo de mitigar los ruidos que se inducen en los conductores que unen una etapa con otra. No dejar ningún pin de un dispositivo que no se utilice al aire porque puede hacer las veces de antena e inducir distorsión electromagnética en el circuito. Reforzar bien todos los puntos de soldadura y asegurarse que las uniones entre los cables y conectores sean firmes para que el contacto entre dispositivos, entre un dispositivo y la tarjeta y entre cables y conectores sea el óptimo. Cuando se utilizan transformadores o bobinados es necesario ubicarlos lejos del circuito de control; no poner cerca las líneas de potencia y de control, entre otros.
- Para implementar satisfactoriamente un Rectificador Controlado es necesario sincronizarse con la red de alimentación y generar los pulsos de disparo con respecto a ésta. De esta manera se asegura que los SCR's sean disparados en los instantes exactos y que conduzcan de acuerdo a la secuencia establecida. Una señal de disparo no sincronizada puede ocasionar que el SCR no se dispare o que entre a conducir en un instante que no debe hacerlo.
- Los temporizadores que llevan el conteo del tiempo correspondiente al ángulo de disparo deben tener una muy buena precisión, para asegurar que los disparos sean realizados en los instantes exactos. También es necesario que la plataforma donde se implementa el sistema de control tenga la suficiente velocidad de procesamiento para realizar cálculos matemáticos en línea sin perder la sincronización que se lleva con la red de alimentación.
- La implementación de un Rectificador Controlado en cualquiera de sus formas no es sencilla porque requiere de la construcción de algunas etapas adicionales que ayuden a realizar el control del mismo. Pero si se compara con

- las utilidades que un circuito con estas características de funcionamiento presenta, se puede concluir que no es tan tediosa.

6. RECOMENDACIONES

Para el funcionamiento adecuado del Sistema de Entrenamiento en Rectificadores Controlados y evitar posibles daños futuros en éste, es necesario seguir al pie de la letra las siguientes recomendaciones de uso:

- Alimentar las tarjetas únicamente con los voltajes recomendados para cada una de ellas. Para el circuito de control, alimentar con 5V; el detector de cruces por cero y el detector de cruces entre fases se deben alimentar con +15V, -15V y +5V y los drivers deben alimentarse con +15V y +5V. Adicionalmente, debe asegurarse que cada una de las tensiones de alimentación se conecte al pin que corresponde.
- Cuando se realicen las conexiones correspondientes a una topología en particular se debe seleccionar el algoritmo de control correspondiente a la misma y se debe utilizar el sensor que corresponda para detectar los cruces en la línea de alimentación; por ejemplo, si se realizan las conexiones pertinentes al Rectificador de Tres Pulsos, se debe seleccionar el algoritmo de control que genera los disparos para esta topología y se debe utilizar el circuito detector de cruces entre fases como sensor, debido a que éste es el que genera las señales que el algoritmo de control necesita para poder funcionar correctamente. De no hacerlo, se expone al sistema a recibir algún daño en su etapa de potencia, porque se van a generar disparos de tiristores cuando no deben de generarse.
- Después que el sistema se ha conectado a la red de alimentación trifásica no se debe tener contacto físico alguno con el barraje de alimentación del sistema, porque puede ser peligroso para la seguridad del usuario.
- Seguir al pie de la letra las instrucciones para configurar el sistema, las cuales se mencionan en el desarrollo de este documento. De lo contrario, no será posible realizar configuración alguna.
- Conectar las fases de la red de alimentación trifásica a la plataforma que contiene el circuito Rectificador en la secuencia que corresponde, de acuerdo a la topología seleccionada. Por ejemplo, si se seleccionan las topologías monofásicas se debe conectar la fase A al punto donde se unen el ánodo del tiristor de arriba con el cátodo del tiristor o diodo de abajo, de la primera rama del puente; y el punto neutro debe conectarse a ese punto pero de la siguiente rama. Cuando se selecciona el Rectificador de 3 pulsos, se debe conectar la fase A al tiristor 1, la fase B al tiristor 2 y la fase C al tiristor 3. Y por último, si se conecta el Rectificador de 6 pulsos, la fase A va al punto común de los tiristores de la primera rama, la fase C al punto común de la segunda y la fase B al punto común de la tercera.

- También la secuencia de fases debe ser la correcta al conectarse a los transformadores que reducen las señales para introducirlas a los sensores, debido a que si no lo es, las ventanas de conducción que éstos generan serán incorrectas y producirán un funcionamiento incorrecto en el circuito de control.
- Evitar presionar el botón de reset en el circuito de control cuando el sistema se encuentra funcionando normalmente, porque interrumpiría de una manera brusca el funcionamiento natural del sistema y por ende, se pueden producir fracturas en los dispositivos semiconductores de la etapa de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

FIGUERES, Emilio. Simulación de circuitos electrónicos de potencia con Pspice. 3 ed. México: Alfaomega, 2002. 203 p.

HART, Daniel. Introduction to power electronics. 3 ed. New York: Prentice Hall, 1997. 418 p.

MOHAN, Ned. Power Electronics: Converters, applications and design. 2 ed. New York: John Wiley, 1989. 667 p.

RASHID, Muhammad. Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. 2 ed. México: Prentice Hall, 1995. 702 p.

RASHID, Muhammad. Power Electronics Handbook. 4 ed. San Diego: Academic Press, 2001. 895 p.

VALENCIA, Gerardo; COLLAZOS, Yupsy. Diseño e implementación de un Rectificador totalmente controlado trifásico. Santiago de Cali, 2004. 80 p. Trabajo de introducción a la investigación (Programa de Ingeniería Electrónica). Grupo de investigación en Energías GIEN. Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingenierías.